



Tesis Doctoral

**ANÁLISIS GEOESPACIAL PARA LA CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LAS
INFRAESTRUCTURAS VIARIAS EN MODELOS DE ACCESIBILIDAD TERRITORIAL
UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

Realizada por:

Francisco Alberto Varela García

Director de tesis:

Luis Antonio Hernández Ibáñez



DEPARTAMENTO DE MÉTODOS MATEMÁTICOS Y DE REPRESENTACIÓN
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

· A Coruña · Octubre · 2013 ·



Resumen

La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) sobre las infraestructuras viarias representa un importante reto en la ingeniería civil actual y del futuro. Bajo la teoría personal que defendemos en este proyecto, de que cualquier dato o saber manejado por el hombre es susceptible de representarse sobre la superficie terrestre, los SIG se convierten en un magnífico instrumento para aumentar el conocimiento humano sobre cualquier realidad. Las nuevas tecnologías ofrecen múltiples posibilidades para aportar datos a los SIG en cualquier campo, y por supuesto sobre las características y el funcionamiento de las carreteras. Pero se requieren nuevos enfoques, planteamientos y metodologías para tratar adecuadamente los datos viarios, y conseguir análisis más completos para una gestión más eficiente de estas infraestructuras.

Esta tesis doctoral propone un método para realizar una parametrización mediante geometría de secuencia de puntos, que permite caracterizar todas las variables técnicas y funcionales que afectan o influyen sobre una infraestructura territorial de trazado lineal, en general, y particularmente sobre una red de carreteras. Gracias a la versatilidad que proporciona este método es posible asignar multitud de parámetros a cada sección del viario, provenientes de distintas fuentes de datos a través de diferentes tecnologías, y tratarlos convenientemente para generar nueva información a partir de ellos. También se permite realizar simplificaciones geométricas de la información mediante la tramificación temática según los aspectos que se necesite, para que pueda manejarse con mayor facilidad sobre los SIG, y ejecutar sobre esos datos diferentes métodos de análisis geoespacial.

La funcionalidad de la red viaria puede analizarse desde múltiples perspectivas, pero sin duda una de las más eficientes y recomendables es mediante el cálculo de la accesibilidad que proporcionan las carreteras en un determinado territorio. Aunque existen gran variedad de modelos de cálculo de accesibili-

dad, el algoritmo de Coste Distancia basado en superficies de costes acumulados, se presenta como uno de los más interesantes sobre SIG, debido a la facilidad para incorporar datos al modelo ráster, y a que obtiene resultados de accesibilidad en cualquier lugar del ámbito geográfico analizado. Sin embargo su operativa de cálculo limita la aplicación de este algoritmo cuando se dispone de modos de desplazamiento especializados con limitación de accesos, como por ejemplo ocurre en vías de alta capacidad o prestaciones como autopistas, autovías, etc. En esta tesis doctoral se proponen dos métodos para superar esta limitación, mediante la Suma de Costes Parciales y con el algoritmo Coste Distancia Condicionado. Este último, además de conseguir modelar con gran fiabilidad cualquier modo transporte sobre la superficie terrestre, ofrece nuevas posibilidades de análisis sobre los modelos ráster gracias a la aplicación de restricciones condicionadas en los cálculos a ejecutar entre celdas vecinas.

Las aplicaciones prácticas realizadas durante la investigación, de estos métodos, tanto la parametrización mediante geometrías de puntos, como los dos nuevos modelos de accesibilidad, muestran su grado de validez y eficacia para el análisis geoespacial de las infraestructuras viarias.



Abstract

Application of Geographic Information Systems (GIS) on road infrastructure represents a major challenge in civil engineering of today and tomorrow. Under the personal theory that I defend in this project, namely that any data or knowledge handled by humans is likely to be represented over Earth's surface, the GIS becomes a great tool for increasing human knowledge of any reality. New technologies offer many opportunities to provide GIS data in any field, and of course on the features and operation of the roads. But, new approaches, proposals and methodologies are needed to properly treat road data and get best analysis for a more efficient management of these infrastructures.

This dissertation proposes a method to perform a parametrization using a sequence of points to characterize all technical and operating variables that affect or influence on a linear path infrastructure, in general, and particularly on a road network. Thanks to the versatility provided by this method it is possible to assign multiple parameters to each road section, from different data sources through different technologies, and treat them accordingly to generate new information from them. It also allows geometric simplifications of the information by connecting the dots on thematic stretches, so it could be more easily handled on GIS, to run on these data different spatial analysis.

Functionality of the road network can be analyzed from multiple perspectives, but certainly one of the most efficient and recommended is by calculating the accessibility provided by the roads in a given territory. Although there are a variety of methods for accessibility calculations, Cost Distance algorithm based on accumulated cost surfaces, is presented as one of the most interesting on GIS, because it is easy to incorporate raster data to the model, and because it gets results anywhere of the geographic region analyzed. However, its calculation method limits the application of this algorithm when there are specialized travel modes with limited access, such as occurs in high capacity roads. In this thesis, two methods are proposed to overcome this limitation by means

of Partial Costs Sum algorithm and by means of Conditional Cost Distance algorithm. The latter, models with high reliability any transport mode on the surface, and offers new possibilities for analysis of raster models by applying conditional constraints to perform calculations between neighboring cells.

Practical applications made during the investigation of these methods, parameterization by means sequence of points, and the two new models of accessibility, show their degree of validity and effectiveness for geospatial analysis of road infrastructure.



Resumo

A aplicación dos Sistemas de Información Xeográfica (SIX) sobre as infraestructuras viarias representa un importante reto na enxeñería civil actual e futura. Baixo a teoría persoal que defendemos neste proxecto, de que calquera dato ou saber manexado polo home é susceptible de representarse sobre a superficie terrestre, os SIX convértense nun magnífico instrumento para aumentar o coñecemento humano sobre calquera realidade. As novas tecnoloxías ofrecen múltiples posibilidades para aportar datos aos SIG en calquera campo, e por suposto sobre as características e o funcionamento das estradas. Pero requírense novos enfoques, formulacións e metodoloxías para tratar adecuadamente os datos viarios, e conseguir análises máis completas para unha xestión máis eficiente destas infraestructuras.

Esta tese de doutorado propón un método para realizar unha parametrización mediante xeometría de secuencia de puntos, que permite caracterizar todas as variables técnicas e funcionais que afecten ou inflúan sobre unha infraestrutura territorial de trazado lineal, en xeral, e particularmente sobre unha rede de estradas. Gracias á versatilidade que proporciona este método é posible asignar multitude de parámetros a cada sección do viario, provintes de distintas fontes de datos a través de diferentes tecnoloxías, e tratalos convenientemente para xerar nova información a partir deles. Tamén se permite realizar simplificacións xeométricas da información mediante a tramificación temática segundo os aspectos que se necesite, para que poida manexarse con maior facilidade sobre os SIX, e executar sobre eses datos diferentes métodos de análise xeoespacial.

A funcionalidade da rede viaria pode analizarse desde múltiples perspectivas, pero sen dúbida una das máis eficientes e recomendables é mediante o cálculo da accesibilidade que proporcionan as estradas nun determinado territorio. Aínda que existen gran variedade de modelos de cálculo de accesibilidade, o

algoritmo de Custo Distancia baseado en superficies de custos acumulados, preséntase como un dos máis interesantes sobre SIX, debido á facilidade para incorporar datos ao modelo ráster, e a que obtén resultados de accesibilidade en calquera lugar do ámbito xeográfico analizado. Con todo a súa operativa de cálculo limita a aplicación deste algoritmo cando se dispón de modos de desprazamento especializados con limitación de accesos, como por exemplo ocorre en vías de alta capacidade ou prestacións como autoestradas, auto-vías, etc. Nesta tese de doutoramento propóñense dous métodos para superar esta limitación, mediante a Suma de Custos Parciais e co algoritmo de Custo Distancia Condicionado. Este último, ademáis de conseguir modelar con gran fiabilidade calquera modo transporte sobre a superficie terrestre, ofrece novas posibilidades de análises sobre os modelos ráster gracias á aplicación de restriccións condicionadas nos cálculos a executar entre celas veciñas.

As aplicacións prácticas realizadas durante a investigación, destes métodos, tanto a parametrización mediante xeometrías de secuencia de puntos, como os dous novos modelos de accesibilidade, mostran o seu grado de validez e eficacia para a análise xeoespacial das infraestructuras viarias.

Índice

RESUMEN	3	4.2. Parametrización puntual de las carreteras	108
ABSTRACT	5	4.3. Aplicación de la parametrización puntual para el análisis de la velocidad media del viario en los cálculos de accesibilidad	116
RESUMO.....	7	4.4. Aplicación de indicadores geoespaciales de carácter puntual para el análisis técnico y funcional del Camino Francés en Galicia.....	131
AGRADECIMIENTOS	11	5. Modelo de accesibilidad territorial de coste distancia condicionado.....	143
1. Introducción y objetivos.....	13	5.1. Consideraciones previas.....	145
1.1.Introducción	15	5.2. Descripción del método de Suma de Costes Parciales	151
1.2. Motivación y antecedentes personales	17	5.3. Descripción del método de cálculo mediante Coste Distancia Condicionado	155
1.3.Objetivos	18	6. Aplicación del método de Coste Distancia Condicionado.....	177
1.4.Estructura del documento.....	19	6.2.Análisis de precisión del método de Coste Distancia Condicionado	216
2. Los SIG como soporte de información viaria. Estado del conocimiento	21	7. Conclusiones.....	235
2.1. Conceptos previos y definición de SIG	23	8. Bibliografía	245
2.2. Breves apuntes históricos sobre los SIG	26	9. ANEJO 1	255
2.3. Componentes principales de un SIG.....	27	10. ANEJO 2	257
2.4. Modelos digitales de información geográfica.....	31	11. ANEJO 3	259
2.5. Aplicaciones del SIG a las infraestructuras viarias	32	12. ANEJO 4	263
2.6. Elección de un software SIG	37	13. ANEJO 5	265
3. La accesibilidad como variable de la funcionalidad viaria. Estado del conocimiento	47	ÍNDICE DE FIGURAS.....	277
3.1. Caracterización funcional de las infraestructuras viarias	51	ÍNDICE DE TABLAS.....	287
3.2. Definición de accesibilidad.....	69	ABREVIATURAS	297
3.3. Indicadores geoespaciales de accesibilidad	72		
3.4. Modelos de accesibilidad territorial sobre SIG	79		
4. Parametrización mediante geometría de secuencia de puntos como método de análisis de infraestructuras viarias	101		
4.1. Consideraciones sobre un inventario de carreteras basado en geometría de secuencia de puntos	104		




Agradecimientos

Después de un período de tiempo amplio y prolongado que ha culminado con la presentación de esta memoria de tesis doctoral, el listado de agradecimientos podría ser enorme si tuviese que nombrar uno a uno a todos los que me han animado y apoyado para que finalmente este momento fuese posible. De todo corazón, deseo dar mi más sentido agradecimiento a todos los amigos que os habéis interesado por esta tesis, y habéis tenido que oírme decir en muchas ocasiones, que aún le faltaba. Hoy que está terminada, tengo que deciros que en parte es gracias a vosotros, pues creo que os merecéis oír un día: ¡ya entregué!

La culminación de un trabajo, aunque sea un proyecto intenso y personal como es esta tesis, siempre implica la participación directa o indirecta de personas e instituciones que de alguna forma han permitido llevar a cabo la labor propuesta inicialmente. Seguramente hoy no hubiese concluido esta tesis sobre accesibilidad y SIG, si en su momento como estudiante de ingeniería de caminos, canales y puertos, no hubiese elaborado un proyecto técnico sobre accesibilidad comarcal en la provincia de la entonces aún llamada, La Coruña, del que era tutor el profesor Carlos Nárdiz, y en donde empecé a trabajar de forma autodidacta con estos sistemas, que nadie antes me había explicado. Y posiblemente hoy la tesis hubiese sido otra, de no haber trabajado intensamente con el arquitecto Antonio Hoyuela descubriendo que el SIG no solo se podía utilizar, sino que se podía hacer para plantear nuevos retos.

Seguramente esta tesis, simplemente no hubiese sido, sin el apoyo de los equipos de dirección de la Escuela de Caminos, bajo la dirección del profesor Fernando Martínez primero, y del profesor Manuel Casteleiro después, quien me permitió además compartir con él los intensos cambios en las titulaciones universitarias de los últimos años como parte de su equipo, hasta que la finalización de esta tesis lo hizo desaconsejable. Y la confianza de los directores del Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación, Ramón Martul primero e Ignasi Colominas más tarde. Y de los profesores y compañeros del Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, en especial Julia Álvarez, y mi paciente director de tesis Luis Hernández, que



desde el 2003 confiaron en mí para no solo impartir la docencia del área, sino para crear y mantener un laboratorio dedicado a la cartografía y los SIG.

La creación del Cartolab cambiará completamente el enfoque que para mí, deben cumplir los SIG en el análisis y en la gestión de las infraestructuras territoriales, y que en parte se recoge en esta tesis. Debo agradecer enormemente a todas las empresas, instituciones y personas que han confiado en este laboratorio para proponer proyectos de colaboración con los que avanzar en las posibilidades de los SIG frente a nuevos retos cada vez más complejos y más interesantes. Instituciones públicas como la Dirección General de Carreteras, la Dirección General de Tráfico, Augas de Galicia, la Dirección Xeral de Patrimonio, de Turismo, de Carreteras, de Paisaje, el Instituto de Estudos do Territorio, Diputación de Pontevedra, etc.; ONG como Enxeñería Sen Fronteiras Galicia; grupos de investigación de la UDC como GEAMA o de otras universidades con los que colaboramos como LaboraTe-USC; empresas como BAU, SIGNO, ICEACSA, PROYFE, etc. que aparecen en proyectos mencionados en la tesis, han permitido y ayudado a que los planteamientos que finalmente he podido plasmar en esta memoria, fuesen poco a poco cogiendo cuerpo.

Un lugar destacado merecen las personas que han trabajado intensamente conmigo en el laboratorio y que debo contar por decenas, o quizás más. Las ganas de saber y aprender, la ilusión por alcanzar retos cada vez más complicados, la responsabilidad en las tareas marcadas, el afán por mejorar y conseguir mayor calidad en los proyectos, y sobre todo la fuerte creatividad que inunda a todos los integrantes del Cartolab han marcado sin duda carácter al proyecto de investigación que se presenta en esta memoria. No puedo mencionarlos a todos, pero os agradezco vuestra aportación, singularmente a los que estuvisteis en el Cartolab en la recta final de este trabajo, Dani, Adri, Fran y Jorge; a quienes participasteis activamente en algunos de los proyectos donde se gestaron ideas que fueron concretándose, con la madurez que da el tiempo y nuevos proyectos, en lo que hoy se presenta en esta memoria. Sabela, Nacho, Txemi, Lalo, gracias. Y también muy especialmente mi agradecimiento

a todos a aquellos que empezasteis en el SIG desde Cartolab, y hoy seguís colaborando conmigo desde iCarto, o desde un poco más lejos.

No sería justo no reconocer el conocimiento transmitido y las aplicaciones creadas por científicos y técnicos conocidos o desconocidos, que me han permitido usar hoy herramientas informáticas, especialmente bajo los principios de software libre como gvSIG, y metodologías de análisis que hicieron posible que desarrollase nuevos métodos para el manejo de la información geográfica en contextos concretos como los presentados en la memoria. De forma singular, debo agradecer enormemente al profesor Juan Carlos Jiménez, además de su labor para la creación de SEXTANTE junto a Víctor Olaya, haberme presentado el gestor de documentos bibliográficos Mendeley, que me ha permitido revisar y repasar con comodidad cientos de artículos e informes, y sin el que creo, no hubiese podido terminar nunca.

Especialmente quiero dar las gracias a mi familia. A mi madre por enseñarme a que con el esfuerzo se puede alcanzar cualquier meta. A mi hermano por haberse dejado contagiar por mi pasión por el SIG, y por contagiarme su pasión por el software libre. A mis suegros por ser un apoyo firme, constante, sincero y un ejemplo de vida para mí. A la familia Serantes por hacerme sentir uno más entre ellos. A Inma, a Martín y a Andrés por todas las horas que os quité, y por las muchas que vamos a compartir.

Fco. Alberto Varela García.
7 de octubre de 2013



1

Introducción y objetivos

- 1.1. Introducción
- 1.2. Motivación y antecedentes personales
- 1.3. Objetivos
- 1.4. Estructura del documento




1. Introducción y objetivos

Las infraestructuras viarias deben entenderse como un conjunto de vías funcionales, complementarias en el espacio, que cumplen el objetivo fundamental de facilitar los desplazamientos de la población en el menor tiempo posible, y en las mejores condiciones de seguridad y comodidad para sus usuarios. Una red viaria bien estructurada debe garantizar la adecuada conexión territorial mediante distintos niveles de viario, proporcionando una correcta comunicación entre todas las poblaciones, y adoptando una ocupación del espacio racional y respetuosa con el medio ambiente. El nivel de desarrollo de la red podrá medirse por el grado de calidad en el acceso de la población a los servicios básicos, como garantía de equilibrio territorial y de justicia espacial que una buena infraestructura viaria deben garantizar.

El origen de las vías de comunicación puede asociarse a la búsqueda para solventar determinadas carencias del hombre. Cuando el lugar donde habita el ser humano no puede satisfacer alguna de sus necesidades, a éste le es imprescindible encontrar otro sitio que las ofrezca, estableciendo un flujo de comunicación entre diferentes zonas geográficas. Estas demandas que inicialmente eran biológicas se complican a lo largo de la historia, tanto como el propio sistema social de la época. Las necesidades de desplazamiento se extienden no sólo al intercambio de materias primas o elaboradas (base del nacimiento del transporte comercial), sino a intercambios culturales o a la posibilidad de acceder a determinados servicios, equipamientos o lugares singulares. Todo ello origina la creación y mejora de las vías para facilitar la comunicación entre los puntos de oferta y demanda establecidos.

El trazado del viario debe atender a las necesidades de la demanda de los servicios de transporte existentes, intentando reducir al máximo los costes de construcción de la infraestructura y los posteriores costes de desplazamiento por ese trayecto. La preferencia será realizar trazados rectilíneos, pero las condiciones naturales del terreno, las características técnicas exigidas en el trazado según los medios de transporte a utilizar, las posibilidades constructivas disponibles, los condicionantes ambientales y sociales, los factores políticos y el propio presupuesto de la obra, alejarán la traza de la línea recta.



Aunque los vehículos de transporte posibilitan la existencia de flujos de comunicación entre dos puntos, será la infraestructura fija la que condicione el transporte y determine la organización del territorio, dotando de cohesión e integración socioeconómica a la región que sirve con unas condiciones adecuadas. Por ello, se puede afirmar que las redes de transporte determinan la accesibilidad de un lugar, lo que condiciona la ubicación de actividades y repercute en el desarrollo de la zona.

Los comportamientos sociales, a su vez, influyen significativamente en la red viaria, generando modificaciones en estas infraestructuras para adaptarse a su grado de utilización, y de demanda futura estimada. El desarrollo socioeconómico y demográfico de un territorio determina el acondicionamiento de la red, tanto en los parámetros técnicos de sus vías como en la propia configuración de su estructura. Así, el desigual reparto territorial de los recursos económicos y demográficos, conlleva la existencia de viarios complementarios entre sí, con diferentes características e intensidades de uso. Se establece por tanto, una jerarquía en las infraestructuras viarias según sus características y funcionalidades, para ofrecer al usuario unas condiciones de movilidad específicas según las necesidades demandadas.

La interacción de las infraestructuras viarias con el territorio se determinará en este proyecto de investigación mediante el concepto de accesibilidad, en donde las relaciones entre dos puntos aumentan en función de la disminución del coste de desplazamiento entre ellos. La accesibilidad territorial se relaciona directamente con el concepto de distancia y por lo tanto con el de espacio, como se desarrollará durante el capítulo 3. Existen diferentes modelos contrastados con los que poder valorar el grado de accesibilidad viaria, de forma que se puede asignar un valor a un lugar según la calidad de las comunicaciones viarias que tiene. Sin embargo la mayor parte de estos métodos se basan en la utilización de datos sobre el viario muy limitados, tanto en el tipo de carreteras empleadas en el estudio (donde normalmente no se considera el viario local, que puede llegar a representar el 70-80% de una red viaria (Galán Bueno, 1999)), como en las características de las mismas, otorgando en mu-

chas ocasiones similares cualidades a la mayor parte de las infraestructuras viarias empleadas en estos modelos.

Las nuevas posibilidades de gestión, análisis y caracterización de los elementos territoriales que ofrece la Tecnología de Información Geográfica (TIG) nos invita a desarrollar nuevos planteamientos para el estudio, la representación y el análisis de las carreteras y caminos que dan servicio al ciudadano. En este sentido es importante establecer pautas adecuadas para la correcta caracterización geográfica o geoespacial del viario existente, y valorar la influencia de los aspectos técnicos de estas infraestructuras en la definición de las condiciones de desplazamiento sobre el territorio. En este proyecto intentaremos profundizar sobre estos planteamientos.

1.2. Motivación y antecedentes personales

Siendo todavía estudiante de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en la Escuela Técnica Superior de la Universidad de A Coruña, comencé a colaborar en el año 1995, bajo la supervisión del profesor Carlos Nárdiz, en diferentes proyectos de investigación en los que se estudiaba, apoyándose en cartografía digital, la red viaria local existente en la provincia coruñesa. Pronto me interesé por analizar la influencia de las carreteras en el grado de desarrollo de las regiones a través de la accesibilidad territorial que ofrecen estas infraestructuras. Elaboré distintos trabajos presentados en esta Universidad sobre la interacción entre la red viaria y el desarrollo territorial, en los que comienzo a profundizar en la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica para estos estudios (Análisis de las comunicaciones comarcales a través de la red viaria de los municipios de la provincia de La Coruña, 2000; Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica al Urbanismo y a la Ordenación del Territorio, 2003; Análisis de la influencia del viario intercomarcal en la transformación de las villas gallegas, 2003).



La especialización adquirida tras cursar, entre 2002 y 2004, el Máster Universitario Internacional en Sistemas de Información Geográfica impartido por la Universitat de Girona, me permitió avanzar en el empleo de las nuevas posibilidades que esta tecnología puede aportar a la línea de investigación iniciada. Como trabajo final del Máster desarrollé un estudio sobre las carreteras de la provincia de A Coruña (Aplicaciones de los sistemas de información geográfica en el análisis territorial de las infraestructuras viarias de la provincia de La Coruña, 2004).

La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los trabajos para la elaboración de la Encuesta de Infraestructuras y Equipamiento Local en esos años, tanto desde la Universidad de Coruña, como desde el Centro de Observación y Teledetección Espacial (COTESA), empresa perteneciente al grupo TECOPY, cambió mi perspectiva sobre esta tecnología, comenzando a interesarme no sólo su aplicación en el análisis territorial, sino también su funcionamiento interno. La posibilidad brindada desde finales de 2003, como profesor del Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría del Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación en la ETS de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Coruña (UDC), incidió notablemente en reconducir los objetivos de los primeros trabajos de análisis de la influencia de las carreteras sobre el desarrollo de una determinada región. Sin desatender esa preocupación, intenté profundizar con mayor detalle en los métodos de análisis geoespacial empleados en los SIG, valorando con más entusiasmo sus ventajas, y reflexionando sobre algunas de las limitaciones encontradas.

La actividad investigadora como profesor de la UDC me ha llevado a crear y consolidar desde entonces, el denominado Laboratorio de Ingeniería Cartográfica (Cartolab¹) que se ha especializado en la elaboración de análisis territoriales mediante el uso, potenciación y mejora de los SIG basados en software libre. La adopción de modelos de investigación y transferencia de resultados bajo la filosofía de las libertades descritas por Richard Stallman en el Manifiesto de


GNU² en 1985, ha propiciado la participación más activa del Cartolab en el desarrollo de funcionalidades y geoprosos de análisis de los SIG en un entorno colaborativo. Esta tecnología pasó de considerarse en el Cartolab, simplemente una herramienta para obtener estudios más precisos y complejos, a convertirse además en un objeto de estudio para mejorar y ampliar sus cualidades.

En proyectos relacionados con infraestructuras viarias, desde el Cartolab he dirigido y participado en trabajos de localización óptima de señales turísticas en Galicia; de caracterización, análisis y representación cartográfica de los Caminos de Santiago; de diagnóstico, análisis y establecimiento de líneas estratégicas para las carreteras de la provincia de A Coruña; de caracterización geográfica de los datos para el Plan de Carreteras de Galicia; de gestión y representación en tiempo real de información de la DGT; de movilidad social dentro de la estrategia gallega de desarrollo sostenible; de la Encuesta de infraestructuras y equipamiento local de las provincias de A Coruña y Pontevedra; de análisis de funcionalidad y accesibilidad viaria en Pontevedra; de análisis funcional de los datos de la autopista AP-9; de análisis de accesibilidad a vías de alta capacidad en el Plan Move de Galicia; etc. Estos y otros proyectos relacionados con infraestructuras o recursos lineales (redes de abastecimiento y saneamiento, ríos, etc.), me han ido marcando una nueva forma de entender estos elementos y de enfocar la investigación sobre ellos mediante los SIG, desarrollando métodos que han orientado las aportaciones científicas recogidas en este trabajo.

La formación como ingeniero de caminos, canales y puertos me mantiene y afianza el interés por las infraestructuras territoriales de servicio a los ciudadanos, en especial, por las carreteras. Y el estudio de las tecnologías de información geográfica me motiva e ilusiona para incorporar la componente espacial a los razonamientos propios de la ingeniería civil en particular, y de cualquier ámbito en general, con lo que alcanzar soluciones más acertadas para los problemas territoriales que se puedan plantear.

¹<http://www.cartolab.es>

²<http://www.gnu.org/gnu/manifesto.html>



Todos estos años de estudio, investigación y trabajo con los sistemas de información geográfica han fortalecido una idea que definiendo desde hace tiempo, y que en cierta manera este proyecto también quiere confirmar. Aunque encontramos muchas referencias que hablan de que aproximadamente el 80% de la información que manejamos contiene algún tipo de referencia geográfica (Masser & Ottens, 1999) (Potsiou, Muggenhunber, & Ioannidis, 2001) (Hung & Yasuoka, 2001), si bien algunos la disminuyen al 70% (Rodríguez, 2001) (Olaya, 2011), **yo estoy convencido de que el 100% de la información y de los datos que se manejan en el mundo tienen de una u otra forma, un componente espacial que se puede referenciar sobre el territorio**³. De hecho, (Haklay, 2010) sostiene, apoyado en (Huxhold, 1991), que la afirmación de que el 80% de la información es geográfica surge de un folleto del ayuntamiento de Burnaby (Canadá), en donde se recogen los resultados de un análisis de requerimientos de un sistema de información geográfico urbano de ese municipio, en el cuál se indica que el 80-90% de la información usada tenía un componente geográfico

La veracidad del análisis de ese folleto municipal es difícil de comprobar, y no hemos encontrado referencias científicas que avalen esa aseveración. Sin embargo, aparentemente a partir de los datos de un folleto local, sin ningún estudio riguroso con validez científica que contraste el dato, muchos autores se han aventurado a considerar cierta tal afirmación, ante la fuerte credibilidad de la misma. De hecho, en cualquier análisis o breve reflexión que se haga sobre cualquier tipo de dato, pronto se encuentra alguna relación o vinculación que pueda asignar unas coordenadas geográficas a ese dato.

Todo elemento material, sea natural o artificial tiene necesariamente un lugar en nuestro mundo conocido, y por tanto una vinculación con la geografía que lo define y contextualiza. Por otro lado, los conceptos, pensamientos y demás elementos inmateriales que el ser humano haya elaborado, descubierto, inventado, fantaseado, soñado o ideado, pueden en primer lugar asociarse a la persona o personas que los crean, y por tanto a infinidad de

³ A lo largo del texto se marcarán con negrilla y en tono verde, algunas afirmaciones o ideas personales que consideremos como aportación del trabajo, además de los métodos desarrollados en los capítulos 4 y 5.

puntos geográficos asociados a sus vidas, como el lugar de nacimiento, de residencia, de trabajo, o de posicionamiento en cualquier momento concreto de su existencia. Por otra parte esas ideas seguramente fueron plasmadas en libros, que publicó una editorial, que los imprimió en una imprenta, que los compró alguna persona, que se encuentran en ciertas bibliotecas, etc. Ideas que pueden ser compartidas por personas de una determinada región en un determinado momento, o que se fueron transmitiendo por más territorios en un proceso temporal más o menos definido. En definitiva, posicionadas sobre una realidad geográfica.

Un reto importante, no trivial, será identificar adecuadamente la ubicación más idónea para cada elemento o idea. Pero con toda seguridad podrá establecerse un punto, un área o un conjunto de espacios que identifiquen geográficamente esa realidad o esa ficción. Y así podríamos razonar con cualquier objeto, hecho o acontecimiento que surja de las leyes de la naturaleza o del hombre a lo largo de la historia, del presente o incluso del futuro ideado.

Si avanzamos más allá de la georreferenciación a través de la cosmografía, extendemos el concepto de localización y de componente espacial, fuera de los límites de nuestro planeta. Pero el planteamiento seguiría siendo el mismo, y podríamos emplear el mismo razonamiento para situar en el Universo cualquier descubrimiento del ser humano. Con ello, se puede afirmar que todo lo conocido por el hombre es susceptible de ser posicionado sobre una cartografía, lo que abre unas posibilidades infinitas a las tecnologías que tratan información geográfica.

1.3. Objetivos

El trabajo presentado en esta memoria incide en la afirmación anterior, aunque de forma humilde y centrada en aspectos muy concretos de las infraestructuras viarias, para buscar nuevas formas de representar y gestionar los datos de las carreteras a través de las funcionalidades que poseen los SIG, y los análisis espaciales derivados de su uso.



Siguiendo las ideas de McLoughlin (1971), los mapas serán un instrumento inmejorable para describir la característica más importante de la red, su geometría. Las representaciones cartográficas de objetos sobre el territorio, son sin duda, el medio informativo más claro, preciso y de mayor rapidez de comprensión, que cualquier descripción escrita o numérica de esa realidad. Por este motivo se apuesta por utilizar todo el potencial para el tratamiento, análisis y visualización de datos geográficos que los SIG poseen, con la finalidad de representar geográficamente cualquier característica propia de las infraestructuras viarias.

Los SIG han servido tradicionalmente para facilitar la ordenación del territorio integrando todos los elementos naturales y artificiales que intervienen en él, siguiendo la línea de trabajo inspirada por (McHarg, 1969). En el caso de los datos propios de las carreteras, su adecuado tratamiento en el SIG, apoyándose en la componente geográfica del viario, permite convertirlos en información precisa y necesaria para la toma de decisiones sobre la red territorial que generan, gracias a modelos que analizan su funcionamiento mediante el cálculo de accesibilidad territorial. La accesibilidad se utilizará en esta investigación como un indicador que refleja con gran precisión las potencialidades de desarrollo de las regiones, tanto desde el punto de vista social y de servicios, como desde la visión de potencialidad económica.

El interés fundamental de este proyecto se centra en estudiar la accesibilidad de cualquier punto de una región, independientemente de si se trata de una ciudad o de un lugar sin apenas población. Las diferencias de los viales que dan soporte a los desplazamientos en esas zonas son notables, por lo que la accesibilidad territorial debe atender no solo a las condiciones de los desplazamientos principales (por ejemplo en automóvil sobre las carreteras) sino también a las condiciones del terreno en otros lugares alejados de las infraestructuras viarias, donde son necesarios otras formas de desplazamiento. Como veremos, el modelo ráster de caracterización de la información geográfica se muestra más adecuado para alcanzar la representación de la accesibilidad de cualquier punto del territorio.


Bajo el título de “Análisis geoespacial para la caracterización funcional de las infraestructuras viarias en modelos de accesibilidad territorial utilizando Sistemas de Información Geográfica” se recoge por lo tanto un interés por profundizar en los SIG para conseguir una modelización más adecuada de las infraestructuras viarias atendiendo a sus condiciones singulares de funcionalidad dentro de una red de carreteras, para analizar más eficientemente la accesibilidad territorial que generan. Para ello, el planteamiento de la investigación gira en torno a dos objetivos fundamentales:

- Obtener una caracterización funcional de las infraestructuras viarias a partir de la adecuada representación y gestión sobre sistemas de información geográfica, de los parámetros fundamentales que definen una carretera, y su funcionamiento.
- Desarrollar un nuevo modelo de accesibilidad territorial basado en el análisis geoespacial de coste-distancia implementado sobre sistemas de información geográfica, que permita establecer condiciones en la funcionalidad del viario, y se adapte al funcionamiento real de las comunicaciones por carretera.

1.4. Estructura del documento

La presente memoria intenta plasmar el trabajo realizado para documentar el planteamiento descrito en los apartados anteriores, e investigar en nuevos métodos para dar cumplimiento a los objetivos marcados. Toda esta labor se ha estructurado de la manera que se recoge el estado del conocimiento en dos capítulos (2 y 3), los métodos propuestos en la investigación en otros dos capítulos (4 y 5), dejando para el capítulo 6 la aplicación del método explicado en el capítulo 5. Las conclusiones del trabajo se presentan en el capítulo 7.

El capítulo 2 presenta los Sistemas de Información Geográfica. Pese a ser una tecnología ampliamente conocida y documentada, hemos querido pro-



fundizar en ella como planteamiento base sobre el que gira el resto del trabajo. En los conceptos explicados, la definición de SIG, los apuntes históricos, la descripción de componentes y modelos de representación, y en la plasmación de las posibles aplicaciones de los SIG sobre las carreteras, hemos intentado no sólo exponer aspectos conocidos, sino que se proponen reflexiones o ideas sobre ellos, que nos ayudarán a enfocar mejor el resto del trabajo. Este capítulo termina con una breve descripción de diferentes software SIG, exponiendo ciertas ideas a tener en cuenta en la elección de uno, y además se presentan algunas experiencias actuales de aplicación de SIG en carreteras desde instituciones y organismos gestores de las mismas.

El estado del conocimiento sigue mostrándose en el capítulo 3, pero en este caso para profundizar sobre las infraestructuras viarias y el concepto de accesibilidad. Así se presenta en primer lugar la caracterización funcional de las carreteras, con una breve introducción a su evolución histórica, una definición del concepto carretera, y su jerarquización actual, para seguir con un análisis de las características geométricas que tienen estas infraestructuras y terminar con un estudio de los diferentes parámetros técnicos y funcionales que describen un viario, y los métodos de adquisición de las mediciones de sus variables. El capítulo 3 se complementa posteriormente con un intenso estudio sobre el concepto de accesibilidad, profundizando en indicadores planteados y modelos desarrollados sobre SIG. Por el interés para el posterior avance investigador, se hace un análisis más detallado sobre el algoritmo Coste Distancia y sus diferentes implementaciones sobre programas de SIG, tanto para modelos isotrópicos, como para modelos anisotrópicos.

Los capítulos 4 y 5 se centran en los métodos propuestos en la investigación desarrollada. El capítulo 4 presenta el método de parametrización mediante geometría de secuencia de puntos para el análisis de carreteras. Además de presentar las consideraciones que se deben tener para manejar información puntual en el inventario viario, se propone una metodología para trabajar con secuencia de puntos y transformarla en tramos con características homogéneas. La utilidad del método se plasma en dos aplicaciones concretas.

Una para obtener la velocidad media de tramos viarios y analizar su validez en un cálculo de accesibilidad. Y otra aplicación para desarrollar indicadores geoespaciales basados en la geometría de secuencia de puntos sobre los trazados del Camino Francés en Galicia.

El capítulo 5 desarrolla dos métodos diferentes: Suma de Costes Parciales y Coste Distancia Condicionado, como propuestas de modelos de accesibilidad basados en el algoritmo Coste Distancia, pero superando sus limitaciones para emplearlo en los análisis viarios que consideren carreteras con accesos restringidos, como por ejemplo las vías de alta capacidad, tipo autopista o autovía.

El capítulo 6 aplica ambos métodos de accesibilidad propuestos en el capítulo 5 sobre diferentes comparaciones para valorar su operatividad y eficacia.

En el capítulo 7 se recogen las conclusiones de todo el trabajo.



2

Los SIG como soporte de información viaria. Estado del conocimiento

- 2.1. Conceptos previos y definición de SIG
- 2.2. Breves apuntes históricos sobre los SIG
- 2.3. Componentes principales de un SIG
- 2.4. Modelos digitales de información geográfica
- 2.5. Aplicaciones del SIG a las infraestructuras viarias
 - 2.5.1. Organización de las tareas en un proyecto territorial
 - 2.5.2. Modelización de procesos de análisis espacial
 - 2.5.3. Publicación y difusión de información geográfica
- 2.6. Elección de un software SIG
 - 2.6.1. Descripción de diferentes software SIG
 - TEREX, TEREX-SIG
 - TeraVial
 - Sigmac
 - gvSIG-Carreteras
 - SIGA
 - Gestión de carreteras de la Diputación Foral de Bizkaia
 - Catálogo de la Red Viaria Provincial de la Diputación Provincial de Lugo
 - SANTI-DGT

2. Los SIG como soporte de información viaria. Estado del conocimiento




Figura 1. Ejemplo del mapa dibujado por el Dr. John Snow que muestra mediante puntos las personas afectadas de cólera por beber agua de los pozos identificados mediante cruces. Fuente: Wikipedia

2.1. Conceptos previos y definición de SIG

La sociedad de la información ha incorporado en las últimas décadas la componente geográfica de los datos a la vida cotidiana. La cartografía ha dejado de ser un elemento de ámbitos profesionales o científicos, con escasa presencia en la actividad del ciudadano medio, para convertirse en una herramienta de primer orden para el público en general, y para las administraciones y empresas en particular. La propia elaboración de la cartografía ha pasado de ser un terreno exclusivo de profesionales y expertos del sector, para convertirse en una tarea abierta gracias a las nuevas tecnologías, que permiten a los usuarios desarrollar y compartir información cartográfica de forma colaborativa.

Desde que en 1854 el Dr. John Snow utilizase por vez primera un mapa (Figura 1) en su investigación científica para determinar la causa de la epidemia de cólera en Londres mediante el estudio de la distribución espacial de los casos registrados (Johnson, 2008), la mayor parte de las disciplinas han incorporado el componente espacial a su contenido básico de análisis, al entender el enorme potencial que presenta la variable geográfica para comprender un fenómeno natural o social. Muchas decisiones políticas, estratégicas y de planificación de acciones sobre el territorio tienen consecuencias geográficas, sino todas, ya que casi todas las cosas que suceden, suceden en alguna parte (Rodríguez Lloret & Olivella González, 2011). De hecho, como ya hemos puesto de manifiesto en el capítulo 1, podríamos afirmar que **cualquier dato manejado por el hombre es susceptible de georreferenciarse**, es decir de encontrar un lugar geográfico donde ubicar esa información.

Un pequeño relato de Jose Luis Borges nos narra la extraordinaria aventura en un Imperio imaginario donde el Arte de la Cartografía alcanzó tal perfección, que permitió levantar un mapa del mismo tamaño que el propio Imperio, coincidiendo puntualmente cada elemento cartográfico con su objeto sobre el terreno. Pronto se percataron de la inutilidad del mapa, y el tiempo lo fue despedazando (Borges, 1960). Esta fantasía narrativa de Borges de obtener un mapa que cubra toda una región con el mayor detalle posible, sin importar el



tamaño del territorio a representar, es técnicamente posible hoy en día, gracias a las Tecnologías de Información Geográfica en general, y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en particular. Es más, las técnicas informáticas permiten una gran versatilidad en el manejo de toda esta inmensa información, haciéndola extraordinariamente útil, mientras que con el formato papel del mapa del cuento de Borges, la utilidad resultaba imposible.

Baudrillard en su trabajo *Cultura y Simulacro* (1978) da la vuelta al final de esta narración de Borges, y es el territorio el que se rompe en jirones pudriéndose lentamente bajo el mapa que lo cubre. Este pensamiento filosófico, que se aborda desde el movimiento basado en la hiperrealidad, nos lleva a una interesante reflexión sobre el peligro de sacrificar la realidad por lo virtual, y que en parte puede producirse si nos dejamos cegar por el brillo de las nuevas invenciones tecnológicas, y a creer afirmaciones que aseguran que “el mapa es más interesante que el territorio”⁴.

Las capacidades gráficas de la tecnología actual posibilitan recrear mundos virtuales visualmente tan reales como el nuestro; sin embargo, nunca alcanzarán a reproducir exactamente las sensaciones y la diversidad de características que nuestro entorno real contiene. Y tampoco creo que deban intentarlo. El objetivo de la representación cartográfica sustentada por los Sistemas de Información Geográfica, no es crear un nuevo mundo virtual sobre el que vivir, sino ayudarnos a vivir con más calidad en nuestro mundo real, lo cual es suficientemente trascendente como para prestarle la importancia que merece.

Con todas estas premisas no es de extrañar que el Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS como acrónimo del inglés *Geographical Information System*) haya experimentado un importante auge en los últimos años, al ser en esencia la herramienta más adecuada para trabajar con los datos geográficos. En la bibliografía especializada podemos encontrar muchas definiciones formales del concepto de SIG, en función de los aspectos del mismo que se valoren como más importantes, ya sean los datos, la tecnología, las operaciones

⁴ Título de una exposición fotográfica del protagonista de la novela “El mapa y el territorio” del escritor francés Michel Houellebecq (2011).

que se permite realizar sobre ellos, o la función para la que se emplean. En 1989 treinta especialistas en SIG consensuaron una definición de SIG como “un sistema de hardware, software, datos, personas, organizaciones y convenios institucionales para la recopilación, almacenamiento, análisis y distribución de información de territorios de la Tierra” (Deuker & Kjerne, 1989, citados por Rodríguez Lloret & Olivella González, 2011). En los años siguientes se fue evolucionando o especificando estos conceptos. Así (Tomlin, 1990) entiende el SIG como “un conjunto de software y hardware diseñado específicamente para la adquisición, mantenimiento y uso de datos cartográficos” que permite “analizar, presentar e interpretar hechos relativos a la superficie terrestre”. (Star & Estes, 1990) lo definen como un “sistema de información diseñado para trabajar con datos referenciados mediante coordenadas espaciales o geográficas. En otras palabras, un SIG es a la vez una base de datos con funcionalidades específicas para datos georreferenciados y un conjunto de operaciones para trabajar con esos datos. En cierto modo, un SIG es un mapa de orden superior”. (Olaya, 2010) defiende el concepto de SIG como “un elemento complejo que engloba una serie de elementos conectados, cada uno de los cuales desempeña su función particular”, dentro de “un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica, y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados”, siguiendo las funcionalidades descritas por (Korte, 2001), aunque encontramos funciones similares en otras muchas definiciones (Clarke, 1986; Burrough, 1986; *Department of the Environment*, 1987; por ejemplo, citados en (Gutiérrez Puebla & Gould, 2000)).

En 1990 el *National Center of Geographic Information and Analysis* (NCGIA) de los Estados Unidos, describía el SIG como “un sistema de hardware, software y procedimientos diseñado para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización y presentación de datos referenciados espacialmente para la resolución de problemas complejos de planificación y gestión” (Peña Llopis, 2006). En este caso se incluye el objetivo final del SIG como un sistema de ayuda para la resolución de problemas geográficos y de apoyo a la toma de decisiones, como ya indicó (Cowen, 1988) para diferenciarlo de otros sistemas de información, como por ejemplo los CAD. En la misma línea po-



demos encontrar la descripción de (Goodchild, 1985) que indica que el SIG es “un sistema que utiliza una base de datos espacial para generar respuestas ante preguntas de naturaleza geográfica”. En general todas estas definiciones cubren tres conceptos principales: es una sistema informático, que usa datos geográficos o espacialmente referenciados, para realizar tareas de gestión y análisis sobre ellos (Heywood, Cornelius, & Carver, 2011).

En definitiva, debemos entender un SIG “como una tecnología aplicada a la resolución de problemas territoriales” (Bosque Sendra, 1997), o como indica Dacey (1970) “cualquier cosa que funcione como un mapa, al comunicar geográficamente la información solicitada por los usuarios del sistema” (Buzai & Baxendale, 2006).

Concentrando todas estas definiciones y considerando el conocimiento adquirido por la experiencia de emplear el SIG durante años y las reflexiones personales expuestas en el Capítulo 1, se plantea en este trabajo definir un Sistema de Información Geográfica como aquella tecnología que integra, mediante medios informáticos, diferentes funcionalidades para gestionar, analizar y presentar cualquier dato, aprovechando la componente espacial del mismo.

Las funciones principales del SIG se pueden concretar entonces en estos tres conjuntos de operaciones: gestión, análisis y presentación de la información geográfica.

- **Gestión de datos:** Gestionar implica hacer las operaciones necesarias para resolver un asunto, por lo que incluimos en este planteamiento todos aquellos procesos para manejar y tratar adecuadamente la información. En la entrada de información será clave disponer de un sistema de almacenamiento y recuperación de datos, plenamente operativo y fiable, de forma que garantice el correcto funcionamiento del SIG (Barredo, 1996). Las fuentes donde se disponga de la información necesaria para el SIG serán generalmente diversas y con distintos formatos, lo que implica que el SIG deberá disponer de medios para homogeneizar y adaptar previamente estos datos. En este proceso se deben corregir ciertos problemas, realizar las transformaciones y reproyecciones cartográficas ne-

cesarias, introducir los atributos temáticos que sean precisos, generar la topología de los elementos espaciales que lo requieran, así como todos aquellos ajustes y procesos que permitan que los datos sean plenamente útiles para obtener información a partir de ellos, y ser aplicados a los procedimientos de análisis y representación posibles en el SIG.

- **Análisis de datos:** Analizar conlleva todas las tareas de procesamiento para aplicar diferentes operaciones y estudiar las características de los datos geográficos existentes, y así obtener nueva información que permita alcanzar posibles soluciones a los problemas espaciales planteados inicialmente. Se trata del aspecto más característico de un SIG (Bosque Sendra, 1997), y posiblemente se pueda considerar como el más importante (Barredo, 1996) pues ayuda a obtener mayor conocimiento sobre un hecho, circunstancia o fenómeno presente o propuesto en un territorio. La aplicación de modelos cartográficos para la combinación y concatenación de procesos y operaciones de cálculo espacial permite abordar problemáticas geográficas complejas (Tomlin, 1991). Además las capacidades de análisis espacial de los SIG permite proponer nuevas operaciones de cálculo, como el algoritmo de coste distancia condicionado para analizar la de accesibilidad territorial que proponemos en la presente investigación en el capítulo 5.
- **Presentación de datos:** Presentar supone mostrar mediante diferentes medios visuales los datos de partida y la información generada tras la gestión y análisis de los mismos. El SIG permite distintas maneras de mostrar los datos de salida, mediante tablas, gráficos, y fundamentalmente mediante mapas que se podrán visualizar en la propia interfaz del SIG, en formato analógico para su uso físico, en diversos formatos para su empleo en diferentes dispositivos informáticos, o mediante su publicación en servicios web a través de Internet. Con las herramientas presentes en un SIG se puede controlar la información que interesa mostrar, y lo que es más importante, cómo interesa que la vea el usuario (Rodríguez Lloret & Olivella González, 2011).

2.2. Breves apuntes históricos sobre los SIG

Los principales componentes que encontramos en los SIG actuales tienen su origen al inicio de la década de los años sesenta con la aparición de los primeros ordenadores que permitieron encauzar informáticamente las necesidades de gestión de datos geográficos. Roger Tomlinson será el primero en acuñar el término de SIG en 1963 (Longley & Batty, 2003) para referirse a estos nuevos sistemas. Concretamente será el Departamento Federal de Energía y Recursos de Canadá quien desarrolle, gracias a Tomlinson y Cols, el primer SIG para la gestión del territorio rural canadiense, con motivo de la realización de un inventario de usos del suelo a escala nacional (Cebrián, 1992). Bajo la denominación de CGIS (*Canadian Geographical Information Systems*) encontramos en 1966 una aplicación informática con capacidad para la creación de datos geográficos debidamente codificados, así como para su análisis y representación. Casi simultáneamente Howard Fisher en Laboratorio de Gráficos Informatizados y Análisis Espacial de la Universidad de Harvard en los Estados Unidos, avanzaba en el desarrollo de formatos gráficos para el manejo adecuado de la información cartográfica mediante el ordenador, sentando las bases de los formatos básicos empleados fundamentalmente en los SIG actuales, es decir de los modelos vectorial y ráster, y que describiremos brevemente en el apartado 2.4.

En la década de los setenta se comienzan a distribuir entre la comunidad cartográfica las primeras aplicaciones SIG, y se avanza significativamente en la investigación y desarrollo del estudio de la información geográfica con base informática. Durante estos primeros años se busca integrar en estos sistemas formulaciones del ámbito de la información espacial, destacando la técnica de superposición y combinación de mapas utilizada por geógrafos en los años 30 del siglo XX (Dobson, 1992)⁵, y descrita ampliamente por Jacqueline Tyrwhitt en 1950 (Cebrián, 1992) en un libro de texto sobre planificación. Posteriormente Ian McHarg la popularizó a finales de los años sesenta con su obra *Design with Nature* (McHarg, 1969), presentando un nuevo concepto de organizar la

información mediante una metodología basada en un análisis cartográfico sectorial de los diferentes aspectos territoriales que deben estudiarse para abordar una planificación respetuosa con el medio ambiente. Esta propuesta marcó un punto de inflexión en el urbanismo moderno, y se puede considerar como la base del actual modelado espacial en los SIG (Barredo, 1996), pues algunos productos SIG específicos se basan aún en los principios que él enunció (Rodríguez Lloret & Olivella González, 2011).

A partir de los años ochenta y especialmente de los noventa, se comienza a popularizar en determinados sectores el uso de los SIG gracias a la aparición de diferentes productos de utilidad en muchos trabajos relacionados con la gestión forestal y ambiental, o con la planificación del territorio. Aparecen los primeros artículos y el primer libro específico de SIG: *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment*, que publicó Peter Burroughs en 1986, que será referente para estudiantes de SIG en todo el mundo (Rodríguez Lloret & Olivella González, 2011). Surgen importantes empresas dedicadas a la generación de SIG, y distintos departamentos y laboratorios universitarios desarrollan sus propias aplicaciones, que adaptan las potencialidades de los SIG a las necesidades de las diferentes disciplinas que los demandan, particularizando sus funcionalidades a ámbitos específicos.

En la última década cobran fuerza distintas aplicaciones SIG basadas en software libre, potenciadas fundamentalmente desde administraciones o universidades públicas, que gracias a su sencillez de uso y facilidad para instalarse, acercan los SIG a multitud de nuevos usuarios que, sin las limitaciones de los costes de licencias privativas, encuentran en estos programas un extraordinario aliado para su trabajo.

Los vertiginosos avances en las tecnologías han acompañado a la evolución de los SIG desde el principio. Aunque inicialmente los SIG intentaron adaptarse a las cartografías existentes, poco a poco las técnicas y formatos cartográficos han ido cambiando para aprovechar su relación con estos sistemas. Gracias a ello se ha podido avanzar en la incorporación de datos geográficos de forma automática a partir de las imágenes tomadas desde los satélites, mediante

⁵ Citado por (Gutiérrez Puebla & Gould, 2000)



los sistemas de posicionamiento (GPS - Global Positioning System) o a través del empleo de los datos procedentes de LiDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) que gracias a su precisión para caracterizar el terreno posibilita nuevos usos y nuevas formas para el análisis de la información.

Las capacidades de gestión y visualización de la información también se han desarrollado con la mejora de los equipos informáticos, y ha aumentado su usabilidad mediante las nuevas tecnologías móviles que permiten manejar datos espaciales con equipos portátiles de tamaño reducido directamente sobre el terreno. La incorporación de las posibilidades que Internet ofrece gracias a los servidores de mapas a través de la red, no es ajena a los SIG que han introducido en sus métodos de trabajo la combinación de datos geográficos digitales procedente de múltiples fuentes mediante servidores locales, de una red privada o a través de redes de información pública, especialmente gracias a las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE).

La creación en 1993 de EUROGI, organización no gubernamental que representa la comunidad de información geográfica europea, y un año más tarde, del Open GIS Consortium (OGC) que agrupa a distribuidores, agencias gubernamentales y usuarios con el objetivo de mejorar la interoperatividad, supone un avance para homogeneizar el uso y la distribución de los datos geográficos mediante la especificación y recomendación de normas, formatos y servicios cartográficos. Con estas organizaciones se potencia lo que se había incluido en la definición de SIG consensuada en 1989 entre una treintena de especialistas en SIG, donde se hacía mención a los convenios institucionales como medio imprescindible para trabajar con la información geográfica.

Asimismo la directiva INSPIRE 2007/2/CE aprobada el 14 de marzo de 2007 por el Parlamento Europeo, y su transposición al ordenamiento jurídico español a través de la Ley 14/2010, de 5 de julio, sobre las Infraestructuras y los Servicios de Información Geográfica en España (LISIGE), se presentan como una iniciativa legal que establece estándares y protocolos de tipo técnico, aspectos organizativos y de coordinación, políticas sobre la información que


incluye el acceso a los datos, la creación y mantenimiento de información espacial por parte de las administraciones públicas. En este sentido, conviene destacar que el interés por la información geográfica no presenta solamente una evolución basada en los desarrollos tecnológicos, sino que va acompañado por un esfuerzo de carácter social y organizativo para coordinar la variedad y cantidad de datos espaciales que deben gestionar las diferentes entidades responsables, ya sean de carácter local, regional, nacional o internacional.

2.3. Componentes principales de un SIG

En la mayoría de las definiciones de SIG anteriormente comentadas, se destacan diferentes aspectos, todos ellos conectados entre sí, que permiten el correcto funcionamiento de un Sistema de Información Geográfica en una organización. **Podemos dividir estos aspectos en cuatro componentes principales:**

- **componente informativo**
- **componente instrumental**
- **componente metodológico**
- **componente organizativo**

El **componente informativo** es el relacionado con los datos a emplear en el SIG y la visualización de los mismos. Los datos serán el elemento principal sobre el que se soporta el resto de componentes, pues su existencia es imprescindible para conseguir el objetivo planteado y llegar a la solución buscada. Son abstracciones de la realidad, que nos permiten parametrizar acontecimientos o describir elementos reales o ficticios que se vinculan sobre el territorio. Rowley y Gilbert (1989) valoraban en un 70% del coste total de un proyecto, las tareas para conseguir un conjunto de datos operativos para trabajar en un SIG (Barredo, 1996). Actualmente es posible disponer más fácilmente de información geográfica que hace unas décadas, entre otras circunstancias, gracias a las posibilidades de comunicación que ofrece Internet



y la distribución de datos geográficos mediante los llamados geoportales (Rodríguez Lloret & Olivella González, 2011). Aun así, la consecución y correcta adaptación al SIG de los datos necesarios para un proyecto, sigue siendo un coste elevado, lo que refleja claramente la importancia de este componente.

Debemos considerar en el dato sus tres aspectos fundamentales: el temático, el espacial y el temporal.

- El temático se relaciona con cualquier característica cuantitativa o cualitativa que identifique y defina, a partir de caracteres alfanuméricos, al elemento o suceso que se está considerando. Un mismo elemento puede manejar diferentes y variados tipos de información que lo caracterizan, tanto si le son asignados, como el nombre o el código, como si son propios de su existencia, como el tipo de elemento, su estado, su tipo de gestión, su propietario, etc. Otro ejemplo de dato intrínseco al elemento podría ser la longitud o la superficie que ocupan, dependiendo si representan una entidad lineal o un área. Aunque la existencia de estos parámetros tiene que ver con el aspecto espacial, en ocasiones se cuenta con un valor de los mismos diferente al obtenido desde la geometría manejada, pues el dato alfanumérico es de mayor precisión que la resolución empleada en la representación gráfica de ese elemento. Además podemos tener datos primarios, como el número de habitantes de un municipio, o datos derivados como podría ser la densidad de población de ese municipio, resultado de dividir sus habitantes entre la superficie que ocupa esa región.
- El aspecto espacial se relaciona con la forma geométrica y la localización geográfica del dato. Será el factor fundamental de la información manejada en el SIG, pues su importancia radica tanto en la esencia propia de los datos, como su potencialidad para establecer las relaciones territoriales entre ellos, y para poder representar adecuadamente la información mediante mapas siguiendo los conceptos del diseño cartográfico. Las relaciones topológicas cualitativas que mantienen

los objetos geográficos entre sí facilitan desarrollar análisis y operaciones complejas con los datos espaciales en el SIG (Bosque Sendra, 1997). La información geográfica tiene una inherente naturaleza visual fundamental para nuestra forma de relacionarnos con lo que nos rodea, puesto que entendemos nuestro entorno de manera gráfica. Aunque a nivel informático los datos manejados por el ordenador son puramente numéricos, será la visualización gráfica gracias a la componente espacial de estos datos geográficos, la que permita al usuario del SIG obtener el máximo rendimiento en la transmisión de información. Por estas razones, podríamos considerar los datos a emplear en un SIG como datos “geo-gráficos”. “Geo” por su aspecto espacial vinculado con el territorio, intrínseco a cualquier dato manejado por el ser humano, como expusimos en la introducción de este capítulo. Y “gráfico”, por la característica visual propia del dato en un SIG, que a través del mapa otorga mayor potencialidad a la comunicación de información entre emisor y receptor.

- La clave temporal de los datos tendrá especial incidencia en aquellos elementos territoriales con un dinamismo elevado, por lo que la actualización continua será imprescindible para poder hacer análisis reales de una determinada situación. Con el paso del tiempo ciertos aspectos temáticos, espaciales, o ambos, cambiarán los parámetros que caracterizan a los objetos o fenómenos que se pretenden estudiar en el SIG. Por este motivo, es importante tener en cuenta en ciertos proyectos, la fecha del dato, para verificar su validez ante los procesos a realizar o, en caso contrario, establecer la necesidad de su actualización. También en ocasiones es fundamental conocer la evolución de los cambios de ciertos fenómenos físicos o geográficos para poder interpretar adecuadamente el presente o establecer las previsiones de comportamiento futuro. Si no se incluye un tratamiento definido de la temporalidad de los datos, especialmente en aquellos más dinámicos, no se puede decir que se disponga de un modelo de datos geográficos completo (Cebrián, 1992).



El **componente instrumental** hace referencia a las herramientas, instrumentos y aplicaciones que dan soporte informático al sistema mediante dispositivos software y hardware. En la actualidad, cuando nos referimos a un SIG se está haciendo referencia a sistemas computerizados (Bosque Sendra, 1997; Gutiérrez Puebla & Gould, 2000), entendidos en su acepción más genérica, como aquellos sistemas que precisan de una máquina electrónica para procesar datos y convertirlos en información útil. Se puede entender que el SIG es un integrador de los aparatos tecnológicos que han surgido en los últimos años alrededor del aprovechamiento de la información espacial, como los sistemas de posicionamiento GPS, las imágenes de satélite, Internet, la telefonía móvil, etc., y demás medios que pueden integrarse en el término científico moderno de geomática, o geoinformática para algunos autores (Buzai & Baxendale, 2006), o geotelemática si nos referimos a la integración de las nuevas tecnologías de la telecomunicación y los dispositivos móviles con los sistemas de información (Botella Plana & Carles Olmedillas, 2011).

El software de los SIG se va adaptando a los avances y mejoras del hardware, para aumentar sus capacidades de respuesta a las peticiones del usuario, e incorporar los nuevos productos y formatos de datos que van apareciendo. Además, los SIG añaden al flujo de trabajo las innovadoras ventajas que ofrecen los nuevos servicios de comunicación, como la web o los móviles, aprovechando todas las potenciales de la tecnología para dotar al dato de un ciclo de vida (entendida como utilidad, en el contexto de la información) más amplio.

El **componente metodológico** establece los procesos y métodos enfocados al análisis de la información a partir de los avances y desarrollos científicos para el estudio, la evaluación y la comprensión de los fenómenos naturales y sociales que tienen lugar sobre nuestro planeta. Este aspecto está muy relacionado con la temática en la que se aplique el SIG, pues según el ámbito de estudio, tendrán más influencia unas disciplinas o unas ciencias que otras, para la aplicación de los métodos de análisis más adecuados. Sin embargo, esta componente metodológica muestra, posiblemente mejor que las otras, el carácter multidisciplinar que acompaña al SIG. Las operaciones permitidas

para tratar y analizar los datos espaciales en el SIG, se basan en formulaciones, más o menos complejas, provenientes del ámbito geográfico, o del físico, o del matemático, o de cualquier otra ciencia. Aunque los orígenes del SIG están muy relacionados con su empleo en la gestión forestal o la planificación urbanística, el conjunto de ciencias sociales y del territorio han aportado el conocimiento propio de su ámbito para dotar al SIG de mayores funcionalidades, dentro de lo que se podría denominar ciencia de la información geográfica con base informática (Olaya, 2010).

El **componente organizativo** engloba las personas, los ámbitos de trabajo y sus procedimientos de gestión y organización que determinarán en gran medida la validez y operatividad del sistema. Maguire (1991) consideraba como el elemento más importante de un SIG a las personas encargadas de su diseño, implementación y uso, definiendo el concepto de *liveware* (Barredo, 1996), en comparación con los de software y hardware incluidos en la componente instrumental.

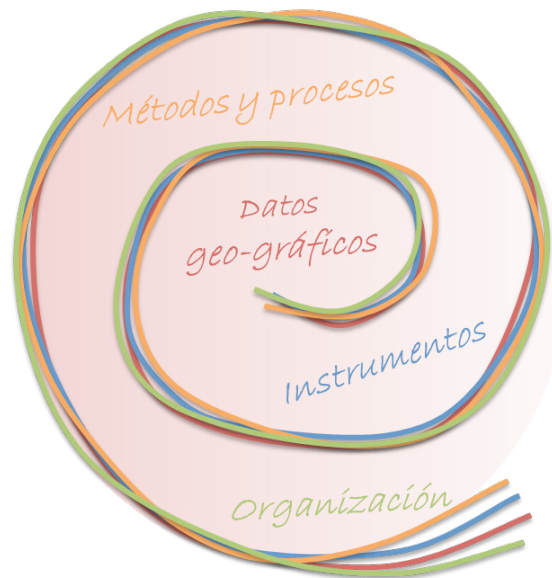
Las funciones de un SIG cubren un amplio rango de actividades y tareas relacionadas con la información geográfica, por lo que se utiliza para los procesos de creación de cartografía, para el almacenamiento de los datos, para la gestión de la información, para consultar las características de elementos territoriales, para elaborar análisis complejos sobre ellos o para diseñar la presentación adecuada de los resultados obtenidos. Los SIG se presentan como medio integrador de múltiples usuarios y técnicos con cometidos muy distintos pero que comparten datos e información⁶ mediante una herramienta común que les permite una mejor coordinación entre ellos, y una organización más eficiente. En este caso la formación adecuada es fundamental para obtener el máximo rendimiento al SIG, puesto que éste incide en los procesos y flujos de comunicación de la propia organización. Por este motivo el SIG debe entenderse en su globalidad dentro de una organización, y desde ese punto de vista habrá que considerar el proceso formativo necesario ante la implantación de un nuevo sistema o modificación del mismo.

⁶ Podemos ver una diferenciación entre datos e información en (Olaya, 2011)

Figura 2. Relación estática de los componentes principales del SIG basada en la propuesta de (Andes, 2006), aunque él propone una división en: conceptos geográficos básicos; tecnología; datos; campos de aplicación; procesos y métodos; visualización.



Figura 3. Relación dinámica de los componentes principales del SIG



Estos cuatro componentes conforman un SIG, entendido como el conjunto de relaciones entre estos componentes, donde el núcleo central son los datos “geo-gráficos” que se manejan mediante instrumentos electrónicos y aplicaciones informáticas, basadas a su vez en los metodologías, técnicas y procesos que dan operatividad a los objetivos y criterios establecidos dentro de una organización (Figura 2). La ausencia o atención inadecuada a cualquiera de estos componentes supone un problema sustancial para el SIG que se quiera implementar, hasta el punto de poder convertir esta iniciativa en un fracaso. Por lo tanto es importante considerar la participación de cada uno de estos componentes a la hora de implantar un SIG para la elaboración de un proyecto territorial que pretenda tener cierta continuidad en el tiempo. Incluso cuando un usuario de SIG pretende resolver individualmente algún problema concreto y puntual, requiere establecer una adecuada organización en los procesos y métodos de cálculo a realizar con los medios informáticos precisos, y por supuesto disponer de los datos geográficos necesarios para alcanzar los objetivos fijados hasta llegar a la solución.

En la práctica un Sistema de Información Geográfica debe ser un sistema dinámico, abierto y en constante evolución, puesto que todos los componentes señalados son susceptibles de cambiar y mejorarse en cada momento. El SIG debe concebirse como un sistema flexible que permita adaptarse fácilmente a nuevos planteamientos, datos, técnicas, dispositivos, aplicaciones, objetivos, usuarios, o cualquier circunstancia que varíe durante su uso. Por este motivo planteamos un diagrama diferente a la visión estática de los componentes que suele mostrarse (Andes, 2006), para representar sus componentes principales, en el que, manteniendo las relaciones jerárquicas entre ellos, se aprecie el dinamismo y la flexibilidad del sistema (Figura 3).

El correcto funcionamiento de un SIG dependerá en gran medida de la correcta interacción entre estos cuatro componentes, siguiendo un orden establecido desde los datos geográficos hasta la organización, o al revés. Quizás también podría plantearse otra secuencia distinta, pero siempre una en la que unos componentes vayan condicionando o definiendo convenientemen-



te a los otros, y viceversa. Y además, la estructura debe permitir la incorporación de nuevos componentes que mejoren e incrementen las funcionalidades del sistema.

2.4. Modelos digitales de información geográfica

El proceso de conceptualización de la realidad para definir la formalización digital de sus variables, y posteriormente abstraer las características geométricas fundamentales de los elementos territoriales que debemos representar en el mapa, no ha sido ni es una tarea sencilla. Los esfuerzos realizados para conseguir una adecuada gestión de esta información desde los comienzos de estudio de los SIG, ha dado lugar a la arquitectura y forma actual de estos sistemas, y a la concreción de los parámetros digitales de los datos a manejar en ellos. Los modelos digitales usados como formas de representación habitual de la información geográfica los podemos clasificar en dos grandes grupos: modelos de representación ráster y modelos de representación vectorial. Aunque en la comunidad científica son bien conocidas sus características, presentaremos brevemente ambos modelos que se utilizan necesariamente en el desarrollo de la presente memoria.

La configuración gráfica de los formatos ráster se suele basar en una unidad geométrica básica, denominada generalmente celda, que se repite sistemáticamente de forma regular haciendo contiguas las celdas entre sí, sin solapamiento, hasta construir una malla que cubre todo el área geográfica a representar. Lo más habitual es que las celdas adquieran forma cuadrada, aunque también encontramos referencias a celdas rectangulares, triangulares o hexagonales (Diaz & Bell, 1988; Liu & Kam, 1999; Stefanakis & Kavouras, 1995), que normalmente hacen referencia a aplicaciones orientadas a investigaciones muy específicas. En general los SIG utilizan archivos ráster de celdas cuadradas, y en este trabajo es lo que se ha empleado.

El interés principal del modelo ráster radica especialmente en su utilidad para el análisis, debido fundamentalmente a la sistematicidad con la que se divide el espacio, siguiendo un patrón determinado, en celdas contiguas no solapadas. La posición de una celda depende de las restantes para conformar toda la malla rectangular que representa el territorio de análisis, lo que permite un enorme potencial de análisis mediante los operadores del Álgebra de Mapas desarrollada a principios de la década de 1980 por Dana Tomlin⁷. En el álgebra de mapas se proponen funciones agrupadas según la forma con la que se utiliza la información de las celdas de las capas a utilizar en los cálculos (Olaya, 2011), con lo que se tienen cuatro tipos:

- Local: el valor de cada celda de la capa resultante es función de los valores de esa misma celda en las capas de partida.
- Focal: el valor de cada celda de la capa resultante se obtiene por los valores de dicha celda y de las celdas de su entorno cercano en las capas de partida.
- Zonal o regional: el valor de cada celda de la capa resultante se calcula a partir del valor de todas las celdas conectadas a esta que presentan un mismo valor para una de las capas de entrada, es decir, que pertenecen a la misma clase.
- Global: el valor de cada celda de la capa resultante es obtenido por el valor de todas las celdas de la capa de partida.

Las celdas del ráster recogen el valor que describe alguna característica sobre el lugar donde se ubican; y el tamaño de la celda, denominado resolución, determina la precisión con la que se recoge una variable dentro de una capa ráster, y por tanto la funcionalidad de ese dato. Además este modelo de representación permite calcular rápidamente áreas y determinar las coordenadas de cualquier punto de la malla.

⁷ Tomlin, C. D., 1983, Digital Cartographic Modelling Techniques in Environmental Planning. Unpublished, doctoral dissertation, Yale University. Citado por (Husdal, 2000)

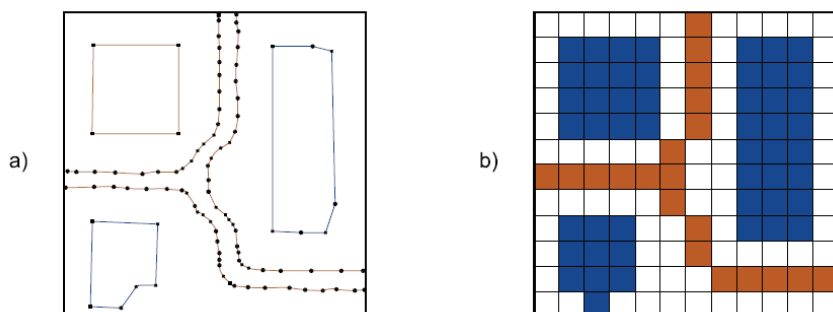


Figura 4. Esquema de los modelos de representación vectorial (a) y ráster (b). Fuente: Olaya, 2010

El modelo vectorial define el ámbito territorial a partir de una serie de elementos geométricos individualizados, con valores asociados a los mismos, y que representan a los objetos geográficos de la zona de análisis. En este modelo se representa la información geográfica mediante las primitivas geométricas fundamentales: punto, línea y polígono. A partir de la sucesión de vértices correspondientes de cada geometría, se definen las coordenadas que caracterizan la forma y ubicación de las entidades geográficas que se representan. Cada elemento del espacio geográfico se define a partir de una serie de puntos que determinan sus propiedades espaciales y de los valores asociados que caracterizan al elemento. Esta asignación de la componente temática a la componente espacial de la información geográfica es la que otorga al modelo vectorial su mayor cualidad como modelo de gestión de información. Además sus características geométricas asociadas a reglas topológicas le confieren un especial interés para determinados tipos de análisis, como puede ser el análisis de redes.

La construcción gráfica del modelo de representación vectorial posibilita incorporar el sentido de circulación por los arcos, líneas o segmentos que forman la red, incluyendo impedancias si fuese preciso, así como aportar restricciones de movimientos en los nodos que unen esos arcos. De esta manera, por poner un ejemplo, en el caso de que las redes esquematizen carreteras, podrían sim-

bolizarse intersecciones viarias de todo tipo, rotondas y cruces a distinto nivel mediante pasos elevados o subterráneos. El funcionamiento y la operatividad precisa en el análisis de redes, requiere un minucioso tratamiento topológico de todos los arcos y nodos existentes para garantizar unas conexiones adecuadas entre todos los elementos de la red.

Cada modelo presenta ventajas e inconvenientes, por lo que será el usuario, en función del problema a resolver, quién determine cuál usar en cada momento o en cada proceso. En los proyectos de SIG es habitual emplear datos en cualquiera de estos dos formatos, puesto que la mayoría de los SIG permite trabajar con ambos, así como hacer conversiones de uno a otro, convirtiendo datos vectoriales en ráster o viceversa, siempre que sea necesario.

2.5. Aplicaciones del SIG a las infraestructuras viarias

Los SIG son herramientas flexibles que se adaptan con facilidad a muy diversos campos de aplicación. Su utilidad se manifiesta en las funcionalidades para el tratamiento de los datos, tanto para aspectos genéricos como para cuestiones muy específicas, por lo que presenta una amplia variedad de formas de uso y de actividades donde ser empleado. La evolución de las tecnologías y los esfuerzos de muchas disciplinas por avanzar en la información geográfica, ha permitido que los SIG hayan alcanzado cotas inimaginables en su origen. Desde las primeras aplicaciones muy específicas, los SIG se han convertido en programas genéricos, desarrollados a partir de diversos elementos, con el fin de tratar, analizar y representar cualquier tipo de información geográfica. La tendencia actual es alcanzar productos SIG lo más amplios y versátiles posibles, incorporando múltiples funcionalidades que permiten su uso en multitud de ámbitos, incluido por supuesto el relacionado con las infraestructuras viarias. Destacaremos a continuación algunas de las principales aplicaciones de los SIG, especificando las tareas concretas que podría tener en trabajos relacionados con las carreteras.



2.5.1. Organización de las tareas en un proyecto territorial

Los SIG corporativos para grandes empresas, entidades o administraciones se presentan como un medio de enorme valía para gestionar la coexistencia de diferentes usuarios de información geográfica con distintas funciones y necesidades. El SIG puede centralizar toda o la mayor parte de la información de carácter espacial para ser tratada eficientemente. La integridad de la información y el cumplimiento de los requerimientos operativos se basará en gran medida en el diseño e implementación que se realice en la base de datos geográfica correspondiente, de acuerdo con los criterios técnicos de los usuarios finales del sistema.

El papel fundamental del SIG en el ámbito viario se encuentra actualmente, sin duda, en esta línea. La gestión recursos y elementos de la red de carreteras de una región, tanto referidos al aspecto constructivo como a la funcionalidad de la misma, es imprescindible que se realice con la máxima eficiencia. El funcionamiento del viario como elemento de comunicación social y económico imprescindible en la vida cotidiana de cualquier sociedad desarrollada, por lo que la eficacia de las actuaciones deben ser la máxima prioridad de las instituciones responsables de estos servicios.

Dada la enorme complejidad existente en torno a la gestión de estas infraestructuras por parte de diferentes instituciones y organismos, disponer de un sistema centralizado que disponga de toda la cartografía con los trazados y que permita acceder con facilidad a la localización y a las características técnicas de la ingente cantidad de elementos e instalaciones dispuestos sobre las carreteras, es fundamental para garantizar un correcto funcionamiento de la red. La localización inmediata de cualquier característica de cualquier carretera, así como de los detalles específicos de cada elemento instalado en ella, permite una gestión más eficiente de estas infraestructuras y garantiza una comunicación eficiente entre todos los agentes implicados en las tareas a realizar sobre el viario. Esto posibilita poder registrar sobre el SIG las actividades de mantenimiento y conservación, así como gestionar y controlar las incidencias que se producen, atendiendo a la situación geográfica de las mismas para

optimizar los equipos de reparación y el orden de resolución de los problemas existentes. Además permite una gestión más eficiente, al poder analizar y detectar posibles problemas, antes de que estos se produzcan, y poder así planificar adecuadamente y con mayor agilidad, las operaciones que conviene realizar en todo momento.

2.5.2. Modelización de procesos de análisis espacial

En muchas actividades es preciso describir realidades o simular fenómenos complejos sobre una región geográfica, o sobre una infraestructura territorial determinada, lo que obliga a realizar operaciones y cálculos para obtener nueva información a partir de los datos origen. Disponer de estos resultados en un momento puntual o mediante un procedimiento sistematizado, resultará vital para comprender algunos aspectos del funcionamiento o estado de una determinada actividad territorial.

Siempre que se requiere planificar una determinada intervención o decidir entre varias opciones posibles, es necesario recurrir a métodos donde es obligado trabajar con gran cantidad de variables sin perder la visión global del conjunto de información que se maneja. En ocasiones disponer de la información actualizada y precisa ya es un gran avance para poder tomar una decisión acertada, y el SIG es sin duda una gran ayuda para ello, pues es un magnífico contenedor de datos muy diversos. Pero en otros casos, es necesario no sólo disponer de un dato, sino que éste debe relacionarse entre varios parámetros para poder elaborar una postura correcta sobre una determinada problemática. Las capacidades analíticas del SIG basadas en la combinación espacial de diferentes fenómenos o elementos geográficos es un apoyo fundamental para los técnicos expertos encargados de tomar las decisiones más convenientes. Dueker (1987)⁸ y Cowen (1988)⁹, al igual que otros muchos autores,

⁸ Dueker, K.J. (1987) Geographic information systems and Computer-Aided Mapping, Journal of the American Planning Association, verano 1987, pp. 383-390. Citado por (Bosque Sendra, 1997)

⁹ Cowen, D.J. (1988) GIS versus CAD versus DBMS: What are the differences?, Photogrammetric Engineering and remote sensing, vol. 54, núm. 11, pp 1551-1555. Citado por (Bosque Sendra, 1997)

coinciden en señalar la capacidad de análisis para generar nueva información a partir de un conjunto previo de datos, como el elemento más característico de un SIG, y que lo diferencia de otros sistemas (Bosque Sendra, 1997).

El análisis y modelado espacial pueden definirse siguiendo los conceptos manejados por Unwin (1981)¹⁰, como el conjunto de procedimientos de estudio de los datos geográficos, en los que se consideran sus características espaciales. Operativamente estos procedimientos pueden considerarse analizando exclusivamente la geometría de los elementos geográficos, o bien integrando en este análisis también los valores temáticos asociados a ellos (Barredo, 1996). Al inicio de la década de los noventa investigadores que trabajan en el análisis espacial reclaman más capacidades de los SIG para determinados procesos, como por ejemplo de planificación o de localización/asignación (Burrough, 1990; Clarke, 1990; Worral, 1990; Goodchild, 1991; Openshaw, 1991; Fotheringham y Rogerson, 1993; Fischer y Nijkamp, 1992; Anselin y Getis, 1993; entre otros citados por Barredo, 1996). En los últimos años han ido incorporándose en los SIG nuevas funcionalidades de análisis, así como mayor capacidad de estos sistemas para integrar módulos con diferentes técnicas y operaciones de análisis espacial. Gracias a permitir la ejecución de una o más secuencias lógicas de operaciones individuales para el procesamiento de datos geográficos, se pueden desarrollar en el SIG complejos modelos de análisis para obtener información descriptiva de una realidad o de un planteamiento futuro. En la actualidad los SIG permiten abordar prácticamente cualquier cuestión geo-espacial que se plantee, siempre que se disponga de los datos necesarios, y de los conocimientos y del tiempo preciso para implementar el modelo de análisis adecuado. La conexión entre la modelización espacial y las funciones operativas de los SIG que aún no estén implementadas, será cuestión de tiempo tenerlas por los indudables beneficios que representan como ya indicaba Bailey¹¹ en 1994.

¹⁰ Unwin, D.J. (1981) Introductory spatial analysis, Londres, Methuen. Citado por (Bosque Sendra, 1997)

¹¹ Citado por (Santos Preciado, 2004)

Aunque no hay una clasificación concreta y consensuada sobre los diferentes tipos de análisis espacial que se pueden realizar con un SIG, y la mayoría de los autores optan por diferenciar los análisis realizados con modelos ráster o con modelos vectorial. **Con un ánimo eminentemente práctico, proponemos una clasificación básica de estas operaciones (Tabla 1) que permitirá ubicar los distintos tipos de cálculos que se emplean en este proyecto.**

Tabla 1. Clasificación básica de los diferentes tipos de análisis espacial que se pueden realizar en un SIG.

TIPO DE ANÁLISIS ESPACIAL	OPERACIÓN ESPACIAL	RASTER	VECTORIAL
Recuperación de información	temática	identificación de píxel	búsqueda, selección
	espacial	extracción	búsqueda, selección
	medidas geométricas	área, perímetro, forma, distancia euclidiana	distancia, longitud, área, perímetro, centroide, etc.
Adecuación de información	traslado	mover	mover
	giro	cambio de orientación	girar
	cambio de características	reclasificación, agregación, cambio de resolución, etc.	edición, asignación, clasificación temática, generalización, etc.
	unión	unión, mosaico, etc.	disolver
Asociación de información	superposición lógica	intersección, enmascarado, etc.	solapamiento, diferencia, contenido en, tocando, etc.
	superposición algebraica	álgebra de mapas	superposición espacial de puntos, líneas y polígonos
Interacción espacial	vecindad inmediata	filtrado, pendiente, orientación, flujo hidráulico, perfil topográfico, etc.	topología, ubicación relativa, contigüidad, proximidad, zona de influencia, etc.
	vecindad extendida	intervisibilidad, interpolación, coste de desplazamiento, camino mínimo, polígonos Thiesen, difusión, etc.	redes

La funcionalidad del viario puede analizarse mediante SIG, entre otro tipo de operaciones espaciales o geoprocesos, a partir de sus capacidades para el análisis de redes. A partir de las demandas en diferentes puntos y de las condiciones de las infraestructuras y del tráfico en un momento determinado, podrían diseñarse adecuadamente los recorridos óptimos para establecer señalizaciones de dirección, elaborar rutas alternativas para casos de corte en algún viario, diseñar rutas para recorrer diferentes lugares en un orden preestablecido optimizando el consumo energético y/o los tiempos de viaje, estudiar las capacidades necesarias para ciertos viales, etc. En todos estos casos deben emplearse diferentes operaciones de asociación de información



y de interacción espacial entre los diversos elementos territoriales que se tengan en cuenta.

Si atendemos a la influencia que el viario ejerce sobre un ámbito territorial, podemos usar la capacidad de los SIG para relacionar diferentes parámetros que se desarrollan sobre espacios geográficos próximos o coincidentes, mediante análisis de asociación de información superpuesta o a partir de técnicas de vecindad inmediata. De esta forma, y usando fundamentalmente modelos ráster, podrían estimarse contaminaciones acústicas de las carreteras en función de la intensidad de vehículos, velocidad, tipología, etc., así como las condiciones y características del entorno, orografía, vegetación, altura de edificios, distancias entre los elementos, etc. Los SIG permiten operativizar los cálculos de procesos complejos en los que intervienen múltiples variables, en los que además de sus características propias, su situación geográfica es determinante en el resultado, como es el caso del estudio de la dispersión del ruido en espacios abiertos.

Pero también se podría realizar la estimación el grado de utilización de un nuevo vial en una región con modelos adecuados implementados sobre el SIG, analizando los factores implicados en la movilidad (número de habitantes, parque móvil, puntos de oferta y de demanda, red viaria existente, características del transporte público, etc.). En el caso de actividades de vialidad inercial, se podría incluso modelizar la evolución de las condiciones de climatología en el trazado de las carreteras para conocer las previsiones en un período mediante técnicas vecindad extendida como las de difusión, y poder así anticiparse a la gestión de tareas de prevención de heladas. Para las tareas de proyecto de nuevas carreteras se podrían obtener múltiples variables a considerar, como la orografía existente, los tipos de suelo, las afecciones presentes en el trazado, etc., mediante superposición lógica de estos datos, así como establecer cálculos necesarios en el proyecto como la estimación de caudales en función de la orografía y parámetros hidrológicos, para diseñar pasos a nivel o el drenaje necesario durante el recorrido del vial, usando por ejemplo funciones de vecindad inmediata, como el flujo acumulado.

Los análisis de accesibilidad, que luego trataremos con profundidad en el apartado 3, los estudios de impacto ambiental, de cuencas visuales, de establecimiento de zonas de influencia, de diseño de nuevos trazados óptimos sobre una región a partir de condicionantes geográficos, de localización de nuevas instalaciones, y otros muchos tipos de procesos analíticos más complejos, resultado de la combinación de diferentes parámetros territoriales, calculados en una única operación o mediante la sucesión de varias operaciones espaciales o geoprocursos, serán posibles con el SIG para que un planificador pueda utilizarlos para diagnosticar o proponer actuaciones sobre la red viaria.

A partir de la funcionalidad de una determinada red de carreteras se podría estimar la localización óptima para un determinado tipo de equipamiento, servicio o industria, considerando además otro tipo de aspectos, como pueden ser los medioambientales, legales, funcionales, logísticos, económicos, etc., que condicionarán la ubicación de esa instalación¹². El SIG puede emplear todos estos factores para calcular el mínimo impacto y el máximo beneficio en la localización buscada, de forma que se pueda encontrar la más idónea a las necesidades territoriales planteadas. De igual forma, podría analizarse en función de las instalaciones existentes en una región los déficits de viario, o las zonas con peor accesibilidad que puede condicionar el desarrollo económico y social de las mismas, como detallaremos con más detenimiento a lo largo de la presente memoria.

2.5.3. Publicación y difusión de información geográfica

Compartir de forma cómoda y fiable dentro de un organismo, o bien públicamente, la información geográfica de referencia en una determinada actividad supone un ahorro de tiempo y recursos. Esta funcionalidad se puede realizar mediante la capacidad del SIG para representar la información a través de ma-

¹² La publicación "Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos" coordinada por Bosque Sendra y Moreno Jiménez, en cualquiera de sus dos ediciones, ofrece una amplia y detallada visión sobre estos aspectos.

pas estáticos o mapas interactivos, que en sí mismos sean un resultado final, o bien que complementen a otros documentos e informes.

Es destacable el importante beneficio que supone disponer de mayor información geográfica de una zona, pues ésta actúa de catalizador y dinamizador para nuevas actividades, estudios, análisis o proyectos en ese lugar. Los servicios de mapas a través de Internet se presentan como extraordinarios aliados para muchos trabajos. Además la necesaria coordinación entre diferentes técnicos o servicios de una misma entidad, hace imprescindible disponer de sistemas que permitan compartir la misma información en tiempo real para trabajar sobre los mismos datos en cuestiones diferentes.

Para facilitar el acceso y la explotación de información pública, se han desarrollado las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE). El Consejo Superior Geográfico las define como un sistema informático integrado por un conjunto de recursos (catálogos, servidores, programas, datos, aplicaciones, páginas Web...) dedicados a gestionar Información Geográfica (mapas, ortofotos, imágenes de satélite, topónimos...), disponibles en Internet, que cumplen una serie de condiciones de interoperabilidad (normas, especificaciones, protocolos, interfaces,...) y que permiten que un usuario, utilizando un simple navegador, pueda utilizarlos y combinarlos según sus necesidades.

La justificación del establecimiento de una IDE se basa en cubrir la necesidad cada vez más creciente de la sociedad para acceder de manera fácil, cómoda y eficaz a los datos geográficos existentes. La Información Geográfica es un recurso de costosa producción y hasta la aparición de las nuevas tecnologías de comunicación, de difícil acceso por varios motivos: formatos, modelos, políticas de distribución, falta de información y de formación, etc. La oportunidad de reutilizar la Información Geográfica generada en un proyecto para otras finalidades diferentes, posibilita un enorme ahorro y ofrece nuevas posibilidades de utilización de los datos.

Las IDEs tratan de establecer una estrategia organizativa asumida por los poderes políticos que permite poner a disposición del público catálogos de datos espaciales “documentados” y hacerlos visibles y accesibles para su uti-

lización. La idea es que cada administración sea responsable de sus datos de forma que se pueda ir construyendo un sistema completo de información, desde los ámbitos locales a los regionales, nacionales o internacionales (Figura 5).

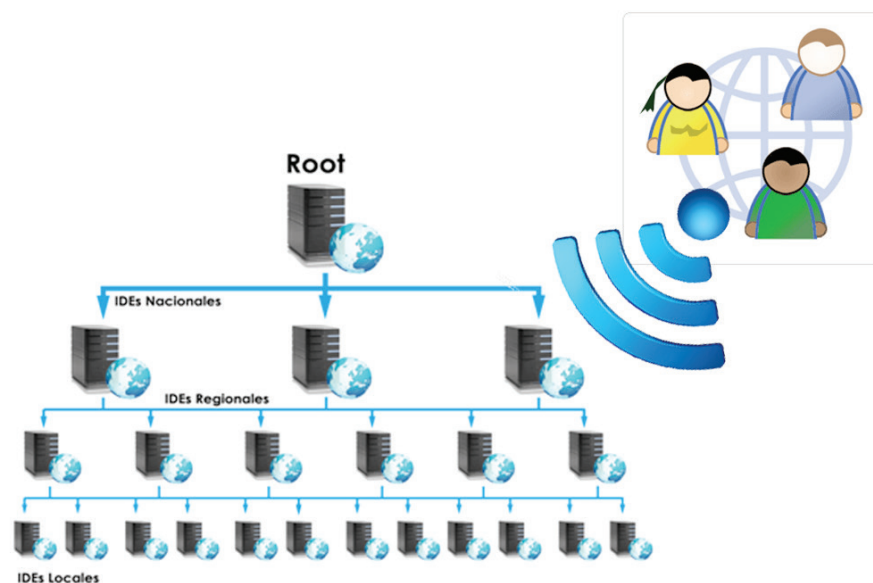


Figura 5. Esquema ideal de Infraestructuras de Datos Espaciales como soporte de información institucional y servicio a cualquier ciudadano del mundo.

Para conseguir una adecuada coordinación en este esquema, es preciso incorporar a los datos nueva información sobre los mismos, o lo que es lo mismo, metadatos. Estos metadatos informan a los usuarios sobre las características de los datos existentes de modo que sean capaces de entender “lo que representan” y “cómo lo representan” para que puedan buscar y seleccionar qué datos les interesan y sean capaces de explotarlos de la manera más eficaz posible. Los metadatos describen: la fecha de los datos, el contenido, la extensión que cubren, el sistema de referencia espacial, el



modelo de representación espacial de los datos, su distribución, restricciones de seguridad y legales, frecuencia de actualización, calidad, etc. Para que la funcionalidad de las IDEs tenga coherencia, la estructura y el contenido de los metadatos deben estar basados en normas propuestas por los organismos competentes de la producción y gestión de la información geográfica a nivel estatal e internacional.

La legislación intenta organizar esta información geográfica, al menos para los poderes y administraciones públicas, por lo que aparecen recomendaciones y leyes, como la directiva europea INSPIRE 2007/2/CE o la Ley 14/2010, sobre las Infraestructuras y los Servicios de Información Geográfica en España (LISIGE), en donde se establecen estándares y protocolos técnicos y de coordinación, para garantizar la mejor eficacia en la gestión y utilización de este tipo de información.

2.6. Elección de un software SIG

En el mercado se dispone de un amplio número de alternativas de aplicaciones SIG para un correcto uso y tratamiento de la información geográfica. Se pueden encontrar desde servidores de bases de datos geográficos a clientes de escritorio para el manejo de la información, o clientes ligeros para trabajar en Web, así como herramientas de gestión de metadatos o bibliotecas de funcionalidad común. Existen publicaciones especializadas con comparativas o descripciones de muchas de ellas, que pueden ayudar a un usuario a tener una visión de conjunto de los principales proyectos actuales, que podemos dividir como cualquier aplicación informática, en dos grandes grupos, en función de si se trata de un software libre¹³ o un software propietario. La licencia bajo la que se distribuye un programa SIG condiciona no sólo la

libertad de uso, sino también los formatos y la implementación de estándares abiertos, las interrelaciones con otros proyectos, ciertas características técnicas en algunos casos, etc., por lo que es interesante analizar todas las repercusiones que supone escoger un software, tanto desde el punto de vista técnico como desde la perspectiva económica o administrativa que condiciona la elección escogida, y que ha sido tenido en cuenta en la redacción de esta memoria.

En los últimos años asistimos a un gran avance del software libre. Esta concepción del software ofrece muchas ventajas frente a las alternativas privadas. Una de las características que lo hacen muy interesante es que, a diferencia de los software privativos que sólo distribuyen los archivos ejecutables, los programas vienen acompañados de su código fuente con el conjunto de archivos que contienen las instrucciones, escritas en un determinado lenguaje de programación, con las que se ha generado esa aplicación informática. Las licencias de software libre ofrecen la libertad de estudiar y modificar este código fuente con lo que se puede conocer lo que hace exactamente el programa en todo momento, estudiar los algoritmos que utiliza, adaptarlo a nuevas necesidades, ampliar sus funcionalidades, crear personalizaciones, realizar mejoras, etc. El desarrollo de estas herramientas informáticas basadas en software libre, permite el aprovechamiento de gran cantidad de partes de programas plenamente funcionales, permitiendo que los esfuerzos se centren en la adaptación, ampliación de funcionalidades y la personalización para ajustarse a las particularidades de cada usuario.

Los programas de software libre acostumbran a cumplir estrictamente los estándares y recomendaciones internacionales en cuanto a los tipos de datos, lo que garantiza la interoperabilidad total con otras aplicaciones. Esto es de gran importancia en las administraciones para realizar intercambio de información entre departamentos, instituciones o incluso para la publicación de datos para acceso público.

¹³ (Montesinos Lajara, Gaspar, & Salinas, 2007) ofrecen una interesante recopilación de software libres empleados en SIG, así como en la actualización de este trabajo que se puede encontrar en <https://confluence.prodevelop.es/display/pan/Panorama+del+ecosistema+de+Software+Libre+para+SIG+-+completo>

2.6.1. Descripción de diferentes software SIG

La única manera de poner en práctica todo el potencial teórico que poseen los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es utilizar aplicaciones informáticas dotadas de las características y funcionalidades para el tratamiento y análisis de los datos geospaciales. Puesto que normalmente no encontraremos un único programa que cubra todas nuestras expectativas y necesidades, ni se adecue a todas las circunstancias organizativas y metodológicas para resolver todos los problemas de análisis territorial con los que nos tendremos que enfrentar. Por este motivo es interesante probar y conocer algunos de los SIG más utilizados en la actualidad, y que en mayor o menor medida utilizamos a lo largo del presente proyecto.

Dentro del panorama de los SIG actuales, hemos utilizado diferentes software SIG para analizar sus funcionalidades, especialmente a la hora de tratar modelos de accesibilidad. También nos han servido para su empleo en determinados tratamientos de datos, análisis geospaciales y en procesos puntuales. A continuación se hará una breve descripción de dos software privativos, ArcGIS e IDRISI, y de cuatro basados en software libre, como son GRASS, QGIS, gvSIG y SEXTANTE. Estos dos últimos, son los principales programas SIG usados en esta investigación, y constituyen dos aplicaciones complementarias, impulsadas inicialmente por administraciones públicas españolas, que han demostrado sobradas capacidades para la realización de la mayoría de tareas que un usuario de SIG necesita y que además cuentan con una amplia base de usuarios y desarrolladores hispanohablantes.

El programa gvSIG¹⁴ es un SIG que impulsó su desarrollo la *Generalitat Valenciana* a partir de un proyecto iniciado en 2004 para la migración a software libre de los sistemas informáticos de su *Conselleria de Infraestructuras y Transporte*. Bajo el convencimiento de que el avance y el progreso tecnológico será siempre más eficiente si se comparten los resultados obtenidos de los trabajos e investigaciones, gvSIG ha revolucionado el sector de los SIG libres a

nivel internacional, especialmente en el mundo hispano, situándose como una alternativa de interés para cualquier usuario que trabaje con la componente territorial de la información.

La estructura modular de su diseño ha permitido que la extensa comunidad de usuarios y desarrolladores haya colaborado ampliando funcionalidades de interés en prácticamente cualquier campo profesional. gvSIG permite capturar, almacenar, manipular, analizar y presentar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión territorial. Se caracteriza principalmente por disponer de una interfaz amigable, siendo capaz de acceder a los formatos más comunes, tanto vectoriales como ráster. Cuenta con un amplio número de herramientas para trabajar con datos de naturaleza geográfica (consulta, creación de mapas, análisis de redes, geoprocementos, representación 3D, uso en dispositivos móviles, etc.), por lo que abarca casi todos los sectores o fases de procesamiento del dato geográfico.

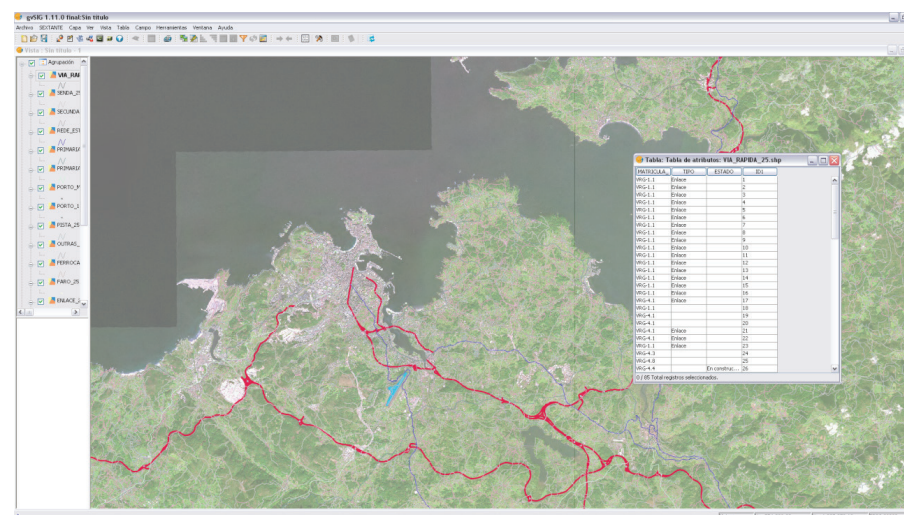


Figura 6. Ejemplo de visualización de información de infraestructuras viarias sobre gvSIG.

¹⁴ <http://www.gvsig.org>



SEXTANTE¹⁵ (Sistema EXTremeño de ANálisis Territorial) es una librería de análisis geoespacial con más de 300 algoritmos para el trabajo tanto con capas vectoriales como ráster. Desarrollado desde la Universidad de Extremadura, con la financiación de la Junta extremeña, en la actualidad sirve como fuente de elementos de análisis espacial a otros Sistemas de Información Geográfica (como por ejemplo gvSIG, QGIS, Kosmo, Udig, OrbisGIS, etc.), así como a otros programas tales como servidores WPS o herramientas ETL con capacidades espaciales. Este programa está enfocado a lograr una implementación y un uso sencillo de cualquier tipo de algoritmo de análisis espacial, buscando facilitar todo lo relativo a las tareas de análisis dentro de un SIG o aplicación relacionada. Bajo el soporte de su interfaz gráfica, es posible integrar GRASS, SAGA, R, y algoritmos de otras plataformas, por lo que se presenta como una solución óptima para usuarios, docentes o desarrolladores que pretendan ampliar su alcance mediante la utilización de infinidad de geoprocursos o el desarrollo de nuevos algoritmos.

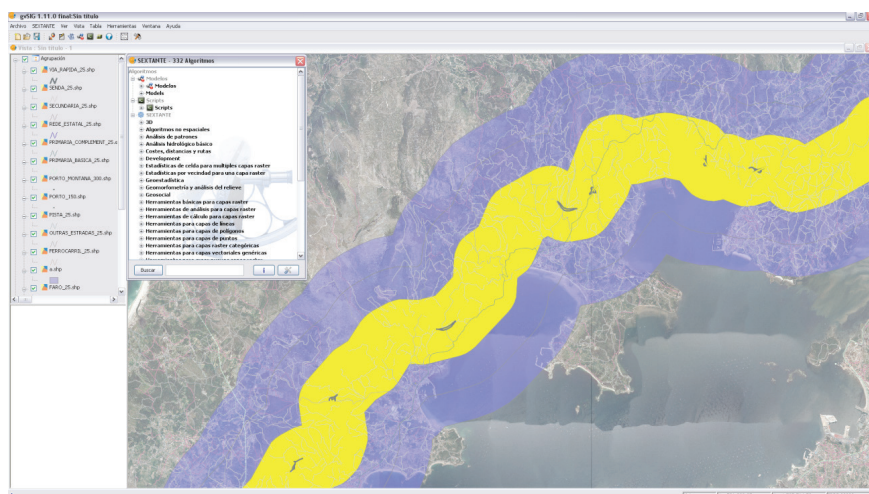


Figura 7. Análisis geoespacial de trazados viarios usando los algoritmos de SEXTANTE desde gvSIG.

¹⁵ <http://www.sextantegis.com/>

El uso conjunto de gvSIG y SEXTANTE permite llevar a cabo la gran mayoría de tareas necesarias dentro de los más diversos ámbitos, constituyendo una herramienta global de gran productividad. Dada la naturaleza modular de ambos elementos, resulta sencillo ampliar las capacidades del binomio gvSIG/SEXTANTE, adaptándolo a las necesidades particulares de cada entorno de trabajo, como ha sido el caso de la presente investigación.

ArcGIS¹⁶ es una *suite* de programas informáticos SIG de escritorio para Windows desarrollado por la empresa ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), fundada en 1969 por Jack y Laura Dangermond. Sin duda esta empresa, que actualmente tiene su sede en California (EEUU), es uno de los agentes más relevantes del mercado geoespacial. ArcGIS es uno de los decanos de las aplicaciones GIS y cuenta con una de las mayores tasas de usuarios en todo el mundo. Durante su larga historia ha tenido diferentes versiones, y en la actualidad se trata de conjunto de aplicaciones (ArcMap, ArcToolbox, ArcEditor...) empaquetadas en una única plataforma, que ofrece mayores funcionalidades en función de la licencia de uso escogida (ArcView, ArcEditor, ArcInfo). A pesar de su elevado coste, ArcGIS sigue siendo la aplicación de referencia en el mundo GIS por su estabilidad y rendimiento. Consta además de un sistema de extensiones que permite incrementar sus funcionalidades y una API que permite desarrollar plugins en varios lenguajes de programación como python, java y otros.

IDRISI¹⁷ es una aplicación SIG para Windows, especializada en análisis ráster, teledetección y procesamiento de imagen. La primera versión publicada por Clark Labs de la *Clark University*, es del año 1987, y fue concebida por el Profesor Ronald Eastman que sigue a cargo del proyecto en la actualidad. Su campo de aplicación principal es el apoyo a la toma de decisiones en ordenamiento territorial, gestión de recursos naturales y modelado medioambiental. Entre sus funcionalidades más diferenciadoras están el análisis de series temporales y modelos predictivos basados en redes neuronales y cadenas de Márkov. IDRISI también

¹⁶ <http://www.arcgis.com/>

¹⁷ <http://clarklabs.org/>

permite el acceso a sus modelos internos a través de una API para python, C++ y otros lenguajes.

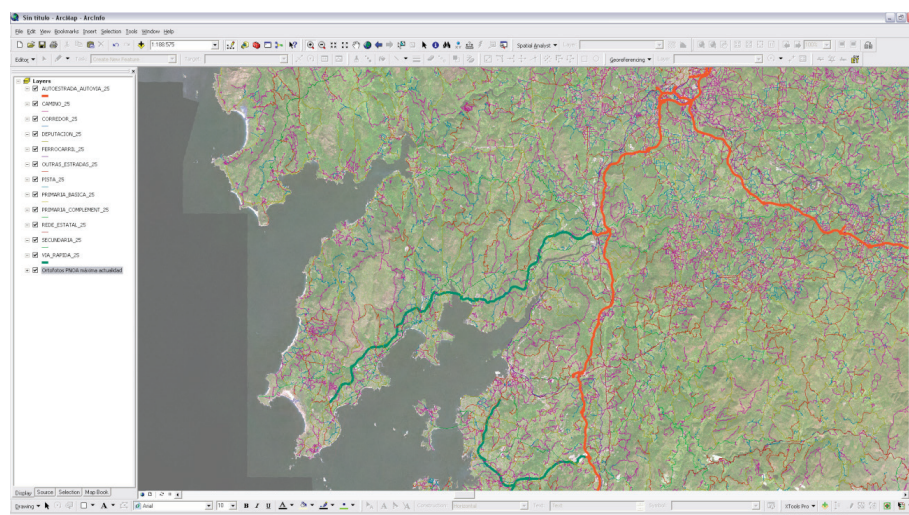


Figura 8. Ejemplo de visualización de información de infraestructuras viarias sobre ArcGIS.

GRASS¹⁸ (*Geographic Resources Analysis Support System*) es una aplicación de escritorio programada en lenguaje C, que corre en numerosos sistemas operativos (Windows, Linux, Mac...) y ha sido publicada bajo la licencia de software libre GNU-GPL. Su primera versión se dio a conocer en 1984, lo que la convierte en una de las primeras aplicaciones GIS y probablemente la primera libre. Además fue uno de los primeros ocho proyectos acogidos bajo el paraguas de la Fundación OSGEO¹⁹. Los desarrollos iniciales de GRASS fueron realizados por un laboratorio del ejército norteamericano (USA-CERL), aunque pronto se incorporaron al proyecto, especialmente tras la marcha del departamento militar de los Estados Unidos, numerosas agencias y universidades, que mantienen su evolución y mejora constante. De hecho, desde

¹⁸ <http://grass.osgeo.org/>

¹⁹ <http://www.osgeo.org/>

sus orígenes fue concebido, como una herramienta muy orientada al ámbito científico. La mayoría de sus geoprosesos están implementados siguiendo distintos algoritmos lo que permite al usuario escoger el más adecuado a la tarea concreta. Su interfaces de usuario sigue la filosofía UNIX de proveer de pequeñas herramientas usables de forma individual que pueden encadenarse para hacer tareas más complejas. A pesar de que no es la aplicación más extendida o fácil de usar, sigue siendo muy usado en algunos ámbitos por su precisión con datos ráster, el modelo topológico que emplea para los datos vectoriales (prácticamente único). Posiblemente la conexión actual con GRASS desde otras aplicaciones más extendidas y que proveen de interfaces más amigables, como QGIS, facilitará el uso de sus algoritmos por muchos más usuarios.

QGIS²⁰ es una de las aplicaciones SIG de escritorio más jóvenes. Gary Sherman la creó en 2002, como una simple herramienta personal para visualizar información espacial de bases de datos PostGIS. La publicó como software libre, entrando en modo incubación en OSGEO en 2007, y hasta 2009 no se llegó a consolidar públicamente su versión 1.0. Su última versión estable la 2.0.1 es de Septiembre de 2013. QGIS es probablemente la aplicación SIG (libre o no) que ha experimentado un mayor crecimiento en los últimos años, tanto en número de usuarios, como de desarrolladores o entidades asociadas al proyecto. Se trata de un software desarrollado en C++ con la librería QT, lo que hace que esté disponible para los principales sistemas operativos y disponga de una interfaz de programación en python para añadirle extensiones o usos avanzados. Emplea otras librerías muy extendidas en el sector de la geomática, como GDAL/OGR, lo que permite acceder a decenas de formatos de fuentes de datos distintas, tanto para el modelo de representación ráster o el vectorial. Además dispone de conectores hacia otras aplicaciones, lo que permite emplear algoritmos de GRASS, SAGA o SEXTANTE desde QGIS. Su uso actual abarca prácticamente todos los campos del sector geoespacial.

²⁰ <http://www.qgis.org/>



Con todas estas referencias de programas SIG, y con muchas otras que también podríamos mencionar (OpenJUMP, Geomedia, Geographics, AutoCAD-Map, MapInfo, SAGA, uDIG, Kosmo, etc.), podemos comprobar como los Sistemas de Información Geográfica han evolucionado en la última década hasta convertirse en herramientas inseparables para todas aquellas entidades o personas que precisen relacionar su trabajo con ámbitos territoriales de los que necesita conocer con detalle los elementos que los ocupan. El potencial que poseen para facilitar la gestión y el análisis de los datos geográficos está creciendo a un ritmo que el límite lo marcaremos los propios usuarios en función de nuestros objetivos y capacidades.

2.6.2. Experiencias de uso de SIG en infraestructuras viarias

Existen innumerables iniciativas y proyectos en los que se utilizan los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estudiar, analizar o gestionar las características o las funcionalidades de las carreteras. No es finalidad de este trabajo hacer una recopilación y análisis de las mismas, pero sí que nos gustaría aproximarnos en cierta medida a algunas aplicaciones empleadas actualmente por agentes e instituciones relacionadas con las infraestructuras viarias. Simplemente una breve descripción de las funcionalidades y aplicaciones de ciertos programas SIG utilizados sobre las carreteras, puede ofrecer una idea de las capacidades de esta tecnología en el ámbito de la gestión de este tipo de infraestructuras.

TEREX. TEREX-SIG

Este software ha sido desarrollado por la Unidad de Carreteras de Teruel, perteneciente a la Demarcación de Carreteras del Estado en Aragón, en colaboración con el estudio de ingeniería Perfil 7. En palabras de su responsable, Carlos Casas Nagore, Jefe del Área de Conservación y Explotación en Teruel, “es una aplicación que incluye el Inventario de elementos de conservación de carreteras. Es la primera necesidad (saber qué tenemos que conservar, con

sus características)”. La aplicación TEREX²¹ ha sido concebida para facilitar la gestión del inventario de elementos, reconocimientos de estado de elementos e análisis de los índices de estado, dentro del marco de la Gestión Sistematizada del Mantenimiento (GSM) (Carreteras, 1999).

Posee una versión GIS, denominada Terex-SIG, que proporciona funcionalidades que enlazan el Sistema de Información Geográfica con la base de datos Terex, permitiendo la representación espacial de todos los elementos del inventario. El Sistema de Información Geográfica utilizado como base para esta aplicación es MapWindowGIS²² (software libre desarrollado por Geospatial Software Lab, de la Universidad del Estado de Idaho en los Estados Unidos). Además de la aplicación de escritorio, está también disponible una aplicación denominada Terex Tablet que permite gestionar y actualizar el inventario de elementos en campo desde dispositivos móviles.

TeraVial

TeraVial²³ es un sistema desarrollado por la empresa Rastertech España, que desde su origen en 1996, surge en respuesta a la demanda existente en el mercado, por parte de las empresas adjudicatarias de algún tipo de contrato de Conservación Integral de Carreteras de una herramienta informática que gestione las tareas de Conservación y Explotación sobre el conjunto de elementos constituyentes de las mismas y por parte de las Administraciones Públicas, de establecer una forma de homogeneizar y normalizar la información que reciben de los diferentes contratistas de conservación

Dispone de un módulo GIS de propósito específico para la gestión de carreteras que permite controlar el inventario y genera mapas temáticos diversos. Dispone de módulos para:

- Planificación

²¹ Disponible en: <https://www.carreterasaragon.com/index.php?type=public&zone=smartportalcategorias&action=view&categoryID=153&codeID=153>

²² <http://www.mapwindow.org/>

²³ <http://www.software-conservacion-carreteras.com/teravial.htm>

- Control de costes
- Informes periódicos para la administración
- Generación y mantenimiento del inventario de elementos a conservar

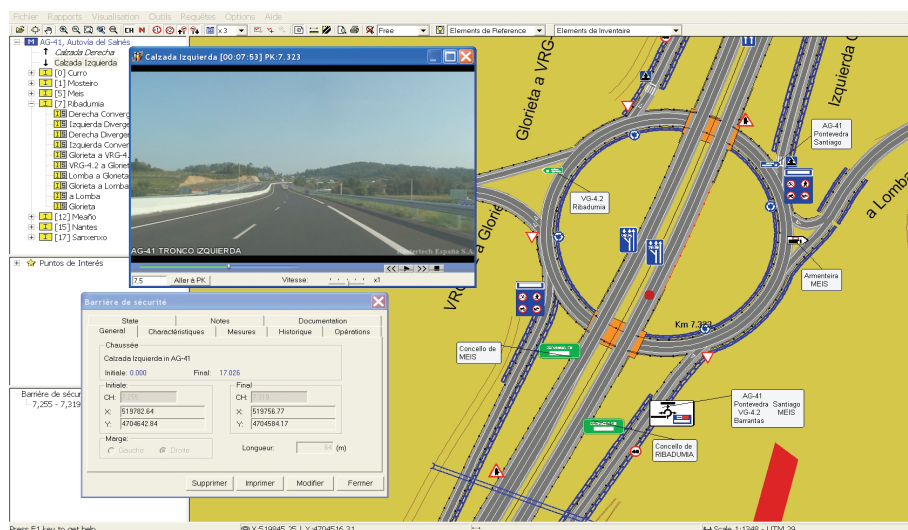


Figura 9. Pantalla de Teravial

Además de la aplicación de escritorio, dispone de una aplicación para PDA que, equipada con un GPS, permite generar directamente en campo partes de trabajo, inventario de firmes, inventario de elementos de la carretera y restitución de la directriz de la calzada.

Sigmac

El software Sigmac²⁴ y todas las aplicaciones que surgen vinculadas al mismo han sido desarrolladas por la empresa Algol desde el año 1992. Sigmac es un GIS destinado a la conservación de carreteras nacionales y autovías, cuyas características propias son:

²⁴ www.algol-gis.com

- La agenda de intervenciones
- La gestión de recursos
- Enlace para exportación/importación desde Infoseg
- Cálculo de indicadores de estado y de prestación de servicio

Gracias a diferentes personalizaciones y desarrollos que lo complementan aparece una versión específica para la gestión de autovías de primera generación, la cual presenta una mayor complejidad y permite:

- Gestión de aforos
- Gestión de tramos de concentración de accidentes
- Registro de comunicaciones e incidencias
- Operaciones, recursos empleados y coste de las mismas
- Vigilancia específica y exhaustiva de los elementos complejos de la carretera: puentes, túneles...
- Programación de actividades: campañas de auscultación de firmes, segado...
- Gestión de almacén. Pedidos. Entradas y salidas. Existencias
- Gestión de personal y maquinaria
- Gestión de materiales
- Cálculo automático de tiempo de respuesta en incidencias
- Cálculo de indicadores de estado e informe de certificación de los mismos
- Gestión de expedientes administrativos
- Generación de documentos de expedientes
- Alarmas de aviso de cumplimiento de plazos

gvSIG-Carreteras

gvSIG-Carreteras²⁵ es una personalización de gvSIG que aporta herramientas para gestionar y analizar la gestión sistemática del mantenimiento (GSM) de carreteras. Ha sido desarrollado por la empresa IVER para el *Centre de Gestió i Seguretat Viària* (CEGESEV) de la Conselleria de Infraestructuras y Transporte, de la Generalitat Valenciana. Tiene como objetivo poder editar y mantener los datos cartográficos de las carreteras, así como la ayuda a la gestión de la información que se genera a su alrededor, como por ejemplo la generación de partes e informes.

gvSIG-Carreteras es una herramienta modular y escalable, sujeta a estándares cuyas características propias desarrolladas más destacables son:

- Gestión de usuarios
- Georreferenciación de las bases de datos mediante segmentación dinámica: proceso de transformación de datos con referenciación lineal (PK's) almacenados en una tabla en entidades que pueden ser representadas en un mapa.
- Catálogos de carreteras (histórico de estados)
- Edición avanzada
- Gestión de accidentes: generación de estadísticas e informes
- Gestión de aforos
- Segmentación dinámica

SIGA

El Sistema de Información y Gestión de AUDASA (SIGA) es una plataforma de gestión diseñada inicialmente por AUDASA²⁶ Autopistas del Atlántico para la autopista AP-9. Ha sido desarrollada conjuntamente por el Laboratorio de Ingeniería Cartográfica de la UDC, Cartolab, y por la empresa iCarto²⁷. Esta so-

lución combina diversos módulos funcionales para la gestión integral y conservación de la carretera, usando diversas tecnologías WEB y SIG.

En la actualidad SIGA contiene módulos para gestionar el inventario de la carretera, las expropiaciones y reversiones de las fincas afectadas por la infraestructura y sus afecciones, policía de márgenes y gestión de expedientes. Todos estos módulos están enlazados, de tal forma que cualquier expediente puede ser consultado tanto desde WEB como desde SIG.

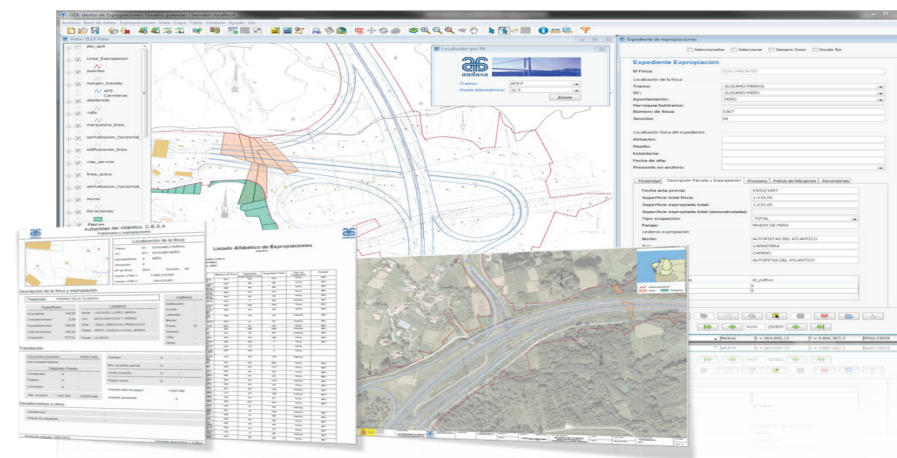


Figura 10. Detalles del Sistema de gestión de carreteras AUDASA (SIGA)

Algunas de las características más significativas son:

- Frontal SIG es un desarrollado sobre gvSIG, realizado de tal forma que se garantiza la compatibilidad con nuevas versiones o complementos de dicho SIG.
- Entorno multiusuario con diferentes roles especialmente en la gestión de expedientes.
- Localización por PK de toda la información.
- Base de datos con capas de geometrías georreferenciadas de inventario de información de la carretera.

²⁵ <http://www.iver.es/index.php/es/productos/gvsig/gvsig-carreteras>

²⁶ <http://www.audasa.es/>

²⁷ <http://icarto.es/>

- Consulta de fuentes externas de datos, como WMS de Catastro, ortofo-
tos, áreas protegidas, etc.
- Creación de mapas, listados e informes automáticos, personalizados
para AUDASA.

Gestión de carreteras de la Diputación Foral de Bizkaia

El sistema de gestión de carreteras de la Diputación de Vizcaya²⁸ es una aplicación SIG a medida, desarrollada por la empresa Bibliomática, para gestionar el inventario de datos de la red foral de carreteras. Ente sus características destacadas está la capacidad de emitir informes combinando la información administrativa de las carreteras con su información geográfica; visualizar incidentes sobre la red; y calcular simulaciones de tráfico.

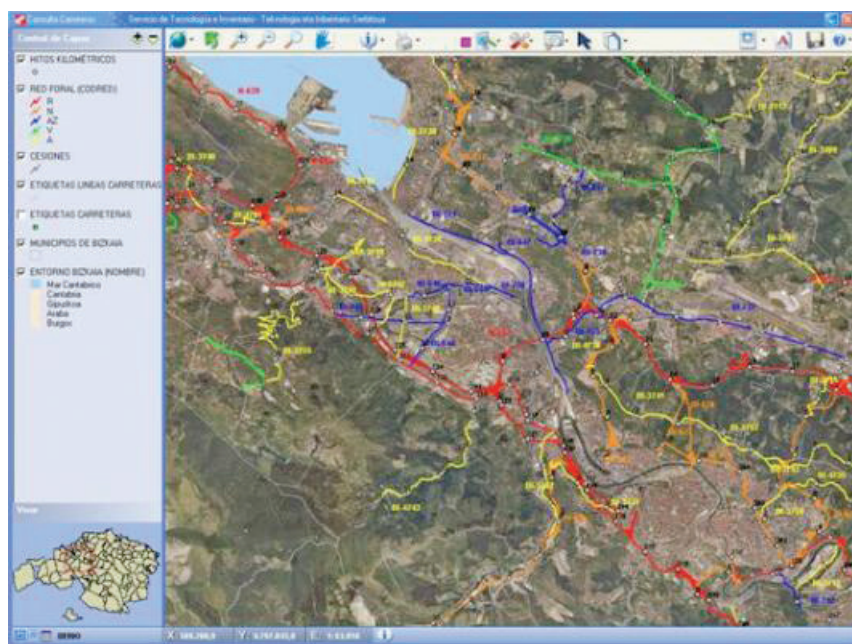


Figura 11. Pantalla del sistema de gestión de carreteras de la Diputación de Vizcaya

²⁸ <http://www.bilbomatica.es/eu/content/gestion-de-carreteras>

Catálogo de la Red Viaria Provincial de la Diputación Provincial de Lugo

Esta herramienta permite la gestión completa de la red viaria de titularidad provincial, gestionada por el Servicio de Vías y Obras de la Diputación Provincial de Lugo, y ha sido desarrollada por la empresa iCarto²⁹.

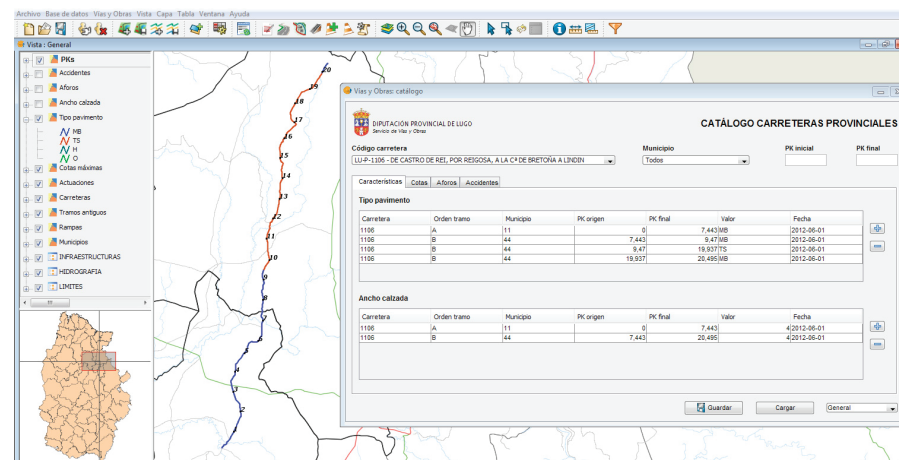


Figura 12. Catálogo de carreteras de la Red Provincial de la Diputación Provincial de Lugo

El cuerpo central de esta aplicación es el uso que se hace de las propiedades de la Segmentación Dinámica para crear un catálogo multiparamétrico de los más de 4.000 km de red provincial. Es posible de una manera muy sencilla clasificar todas las carreteras en tramos según plataforma, conservación de pavimento, tráfico, altitud, dimensiones, señalización, etc. Es posible además incorporar incidencias o elementos puntuales en un determinado pk, así como editar las geometrías y visualizar de una forma ordenada toda la red sobre gvSIG.

La herramienta dispone además de informes y listados personalizados a las necesidades específicas de un gestor de infraestructuras viarias.

²⁹ <http://icarto.es/>

SANTI-DGT

El Sistema Avanzado de Navegación sobre Terrenos Interactivos (SANTI), desarrollado por el laboratorio Videalab de la Universidade da Coruña desde 1998, es un visualizador 3D interactivo de terreno que permite al usuario navegar a voluntad por la geografía contenida en una base de datos geográficos y capas SIG de todo tipo:

- Entidades Punto, que pueden tener asociada iconografía y desplegar visores específicos de metadatos
- Entidades línea, con color y grosor variable proyectadas sobre el terreno
- Entidades línea 3D
- Polígonos, con características de color y transparencia variables en bordes y relleno.
- Modelos tridimensionales de edificaciones, obras, etc.
- Elementos multimedia, imágenes, vídeo y páginas HTML

Aunque no es un SIG, es un sistema multifuncional que cuenta con una adaptación como visor de información del tráfico en tiempo real³⁰, para su utilización como sistema de gestión de información viaria, y que se encuentra instalado en el Centro de Gestión de Tráfico del Noroeste de la DGT, y que tiene capacidad de mostrar e interactuar con diferentes elementos de gestión viaria (Varela García et al., 2005):

- Paneles de Mensaje Variable
- Sensores de presencia o puntos de aforo
- Cámaras de Circuito Cerrado de Televisión (CCTV)
- Radares fijos o móviles
- Estaciones de Captación de Parámetros Meteorológicos
- Postes SOS o postes de emergencia

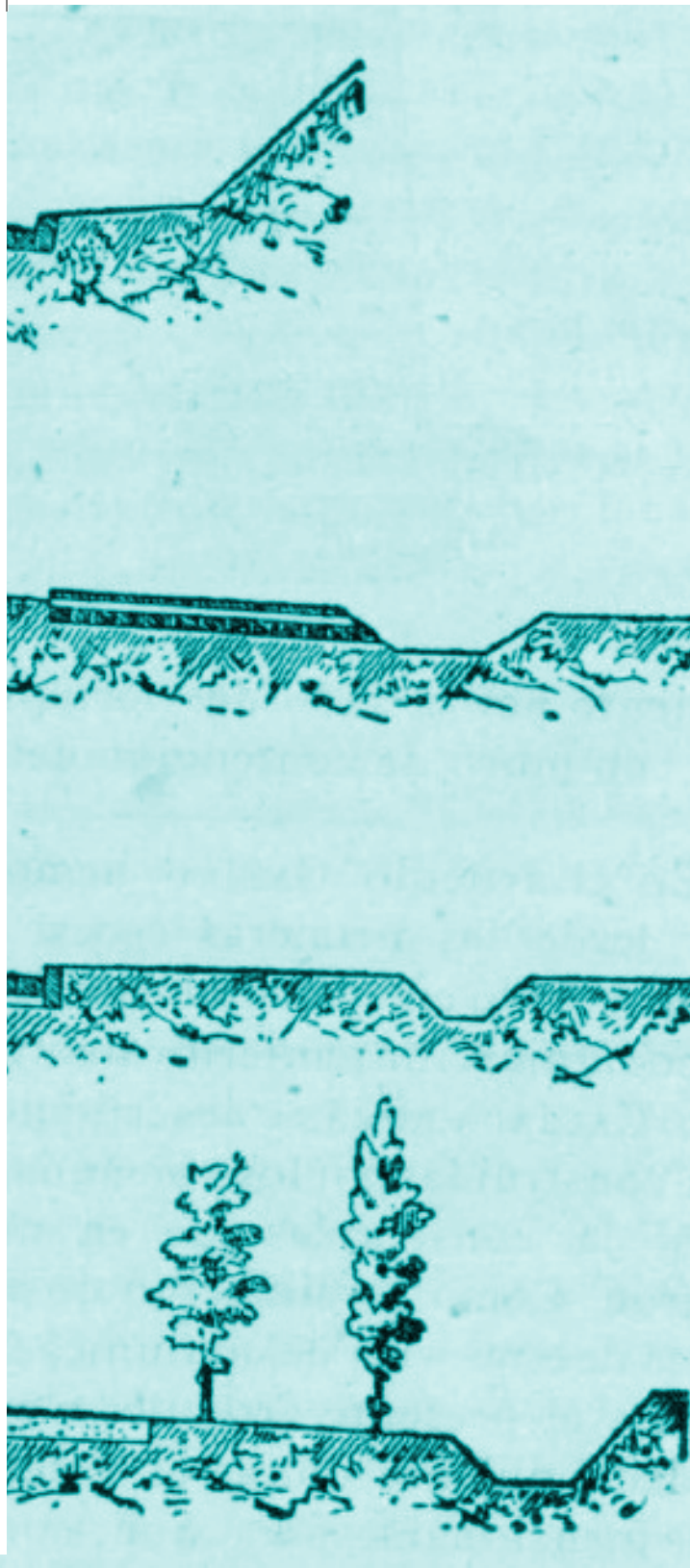


Figura 13. Visualización de paneles luminosos sobre SANTI.

La importancia de esta aplicación radica en la facilidad para mostrar gran cantidad de información de múltiples formatos sobre amplios territorios, de una forma flexible, rápida y cómoda, lo que lo convierte en un excelente aliado para los gestores de infraestructuras territoriales de gran extensión como son las redes de carreteras.

³⁰ http://videalab.udc.es/es/dgt_paneles





3

La accesibilidad como variable de la funcionalidad viaria. Estado del conocimiento

3.1. Caracterización funcional de las infraestructuras viarias

3.1.1. Breve análisis histórico de la evolución de la red viaria

3.1.2. Definición de carretera

3.1.2.1. Análisis de las titularidades de carreteras

3.1.3. Trazado geométrico de una carretera

3.1.4. Parámetros técnicos y funcionales de una carretera

3.1.4.1. Capacidad de una carretera

3.1.4.2. Inventarios de carreteras

3.2. Definición de accesibilidad

3.3. Indicadores geoespaciales de accesibilidad

3.4. Modelos de accesibilidad territorial sobre SIG

3.4.1. Algoritmo de Coste Distancia

3.4.2. Modelo general anisotrópico y particular isotrópico

3.4.2.1. Aplicaciones SIG para el modelo Coste Distancia Isotrópico

3.4.2.2. Aplicaciones SIG para el modelo Coste Distancia Anisotrópico




3. La accesibilidad como variable de la funcionalidad viaria. Estado del conocimiento

El conjunto de actividades que se desarrollan dentro de una sociedad (residencia, producción, formación, consumo, ocio, etc.) genera una necesidad de desplazamiento que es satisfecha por un sistema de transporte basado en el vínculo entre infraestructuras y medios de locomoción. Como cualquier otra actividad humana, las redes de infraestructuras de transporte en general, y las carreteras en particular, se asientan en el territorio. Pero éste modifica sus características espaciales por el carácter deformador que las redes de infraestructuras provocan en la accesibilidad territorial (Subero Munilla, 2009). La interacción entre infraestructuras y medios de transporte, propicia flujos complejos entre orígenes y destinos diversos, que necesariamente provocan una transformación del territorio (Cardozo, Gómez, & Parras, 2009).

Los planteamientos fundamentales de ordenación del territorio en la actualidad se basan en intentar alcanzar un desarrollo equilibrado y policéntrico, que garantice a todos los ciudadanos la igualdad de acceso a los servicios, a las infraestructuras y a los nuevos avances técnicos, siempre dentro de un marco de respeto y cuidado al medio ambiente y al patrimonio cultural (Comité de Desarrollo Territorial de Unión Europea en la Estrategia Territorial Europea, 1999). Además la correcta planificación de las infraestructuras es la única forma de evitar el mal consumo de recursos dentro de las economías (Subero Munilla, 2009).

Un criterio fundamental para elaborar una buena planificación territorial es analizar las carreteras desde el punto de vista de la funcionalidad que aportan, identificando las diferentes relaciones territoriales a las que da soporte la red viaria. El estudio de las infraestructuras viarias desde el punto de vista de su funcionalidad constituye un proceso complejo. Se requiere tener en cuenta todas las carreteras existentes independientemente de la administración que las gestione, conocer sus características y la previsión de desarrollo para cada viario según su titularidad (Pardiñas Lamas, Penabab Gómez, & Varela García, 2011). Además deben identificarse otros modos de transporte con los que puede interactuar la movilidad por carretera, analizando la posición de los puntos de intercambio modal. Y por supuesto es fundamental analizar la ubicación e



importancia de los nodos que establecerán las relaciones territoriales a las que la red de carreteras debe atender, ya sean asentamientos de población, áreas de desarrollo industrial, zonas turísticas, ámbitos naturales, o equipamientos y servicios básicos de una región. El grado de funcionalidad de las vías condicionará la estructura de un territorio y la calidad del servicio de su población, pudiendo afirmarse que un sistema de infraestructuras viarias alcanzará la máxima funcionalidad en el espacio cuando el tiempo empleado en los desplazamientos a través de él, es el menor posible.

En el territorio de las redes en el que vivimos (Dupuy, 1998), la conexión a la red adquiere una importancia fundamental, y las líneas de movilidad más relevantes del territorio se configuran como auténticas generadoras de potencialidades económicas y sociales (Subero Munilla, 2009). Los modelos para el cálculo de la accesibilidad se presentan como uno de los indicadores más adecuados para valorar la funcionalidad de una red viaria, pues permiten detectar los entornos geográficos con peores comunicaciones, e identificar aquellos servicios con carencias en su cobertura geográfica o social. Estos modelos son un importante instrumento en potencia para determinar y cuantificar las desigualdades existentes en una región. Además ayudan en la búsqueda de una organización territorial equilibrada, facilitando la localización de aquellas carreteras o corredores sobre los que resultará más interesante elaborar un programa de actuaciones que solucione, o corrija en parte, las deficiencias de accesibilidad analizadas, y estableciendo a partir de ahí, nuevas potencialidades de desarrollo en la región. Por este motivo, los estudios y propuestas de planes de desarrollo y planificaciones territoriales utilizan modelos de accesibilidad para detectar y corregir los desequilibrios que pueden originar las transformaciones de las infraestructuras y las actividades en un territorio.

Desde que Von Thünen publicó en 1826 un sencillo análisis sobre la localización agrícola, expresando la accesibilidad en costes del transporte de los productos del campo a la ciudad en un espacio isotrópico, este concepto se estudió desde muy diversos puntos de vista como el físico, el temporal, el económico, etc. Aparecen diversidad de métodos e indicadores de accesibilidad que res-

ponde a una serie de variables como es la morfología de la red en el territorio, la conectividad entre núcleos, el grado de cohesión existente, etc. recogidas mediante una serie de índices, como veremos en apartados siguientes. A partir de ellos se puede determinar la coherencia de la red y su nivel de desarrollo desde el punto de vista jerárquico y de accesibilidad, lo que nos ayuda a evaluar la articulación territorial provocada por los ejes de transporte y la calidad de las comunicaciones que estos generan. Generalmente estos indicadores están basados en parámetros identificables o medibles sobre la superficie terrestre (distancias, localizaciones, tiempos, etc.), con simplificaciones más o menos acertadas. La aparición de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha simplificado en gran medida los cálculos a realizar con esos parámetros, gracias a su capacidad para manejar información geolocalizada. Al llevar las expresiones matemáticas de cálculo de accesibilidad al ámbito geométrico, se ha permitido desarrollar en los SIG diferentes algoritmos informáticos que aportan soluciones más precisas, en menos tiempo y con una visualización a través de mapas, lo que permite un tratamiento de los datos y de los resultados, mucho más eficaz.

El análisis de accesibilidad permite entender las carreteras como un elemento del territorio con una función concreta de servicio y transporte, sobrepasando el enfoque que las reduce a unas características geométricas con un nivel de seguridad y de servicio que, aun siendo necesario e importante su conocimiento, aíslan la carretera de su contexto territorial. Muchos de los indicadores usados para la gestión de las carreteras están basados en datos fundamentalmente económicos (tráficos, intensidad, longitud viaria, superficie, etc.), sin vincularlas a su función social y territorial que poseen. Es necesario adaptar la metodología de inventariar las necesidades viarias para expresarlas en términos de índices de acceso y porcentaje de población conectada a la red de comunicaciones y a los servicios que ofrece la carretera (Ghellab, y otros, 1999). En este sentido los estudios de accesibilidad son un elemento clave para analizar la eficiencia de los sistemas de transporte y ayudar por lo tanto, en los procesos de planificación territorial (Liu & Zhu, 2004a).

3.1. Caracterización funcional de las infraestructuras viarias

Actualmente las infraestructuras viarias constituyen el elemento fundamental en los desplazamientos de la población dentro de cada región, debido a la importante presencia del vehículo privado en la vida cotidiana de la sociedad occidental. Aunque la matriculación de vehículos y el número de nuevos conductores en España ha descendido en los últimos años, el parque de vehículos sigue creciendo (Figura 14), lo mismo que el número de conductores³¹ (Figura 15). El transporte por carretera, tanto de viajeros como de mercancías, es el modo predominante para el transporte interior en todos los países del mundo (Kraemer, y otros, 2003). En España se realiza por carreteras aproximadamente el 90% del transporte de viajeros y el 77% del transporte de mercancías (Gonzalo Orden, 2004).

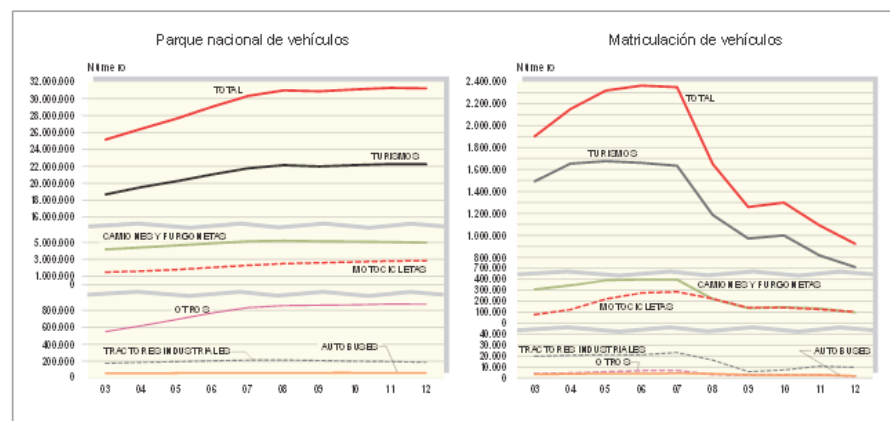


Figura 14. Evolución del parque y matriculaciones según tipo de vehículo. 2003-2012. Fuente: Anuario estadístico del Ministerio de Fomento 2012.

³¹ Datos del anuario estadístico del Ministerio de Fomento de 2012. Disponible en http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ESTADISTICAS_Y_PUBLICACIONES/INFORMACION_ESTADISTICA/EstadisticaSintesis/Anuario/2012/TablasAnuario2012.htm

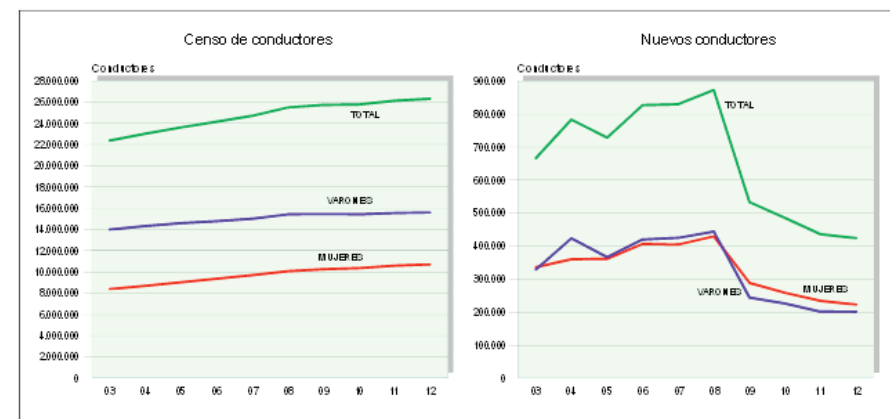



Figura 15. Evolución del número de conductores por género. 2003-2012. Fuente: Anuario estadístico del Ministerio de Fomento 2012.

La red viaria debe asegurar su función de movilidad dentro del territorio, permitiendo una circulación rápida, cómoda, económica y segura de los vehículos automóviles (Kraemer, y otros, 2003), y además respetuosa con el medio ambiente en la medida de lo posible. Pero por otro lado, debe permitir el acceso de este tipo de vehículos a aquellos puntos del territorio que estén habitados o sean de interés para el desarrollo social o económico de una región. La estructura de la red de carreteras y las condiciones de estos viarios determinarán el tiempo empleado en los desplazamientos, y por tanto, la eficacia de estas infraestructuras en cada territorio. Aunque no es el único factor responsable, una red viaria con un correcto funcionamiento incide positivamente en la mejora del bienestar social, dotando de un adecuado servicio de comunicación a todos los habitantes de la región, aumentando su grado de participación en la comunidad, y favoreciendo el establecimiento de nuevas actividades económicas. Disponer de infraestructuras y redes de carreteras es una condición necesaria para que el desarrollo económico y social sea eficaz y duradero (Ghellab, y otros, 1999).

La importancia del grado de equilibrio de la red de un territorio se pone de manifiesto fundamentalmente en la localización de equipamientos y servicios básicos para dotar de las mínimas condiciones de calidad de vida a una deter-



minada comunidad poblacional. El lugar de emplazamiento de esos servicios debe minimizar las distancias al resto de lugares a los que sirven, atendiendo al mayor número de personas con la máxima eficacia en los desplazamientos. Existen multitud de aproximaciones diferentes para evaluar la equidad en el reparto de recursos de consumo colectivo (Salado García, 2004) mediante índices e indicadores para cada tipo de equipamiento concreto en función de determinados aspectos sociales, territoriales o urbanísticos. Los análisis de accesibilidad se presentan como un magnífico aliado para evaluar el bienestar de una población en función del estudio comparativo de situaciones dotacionales en diversas regiones, especialmente gracias a su empleo sobre Sistemas de Información Geográfica por permitir incorporar y combinar datos muy diversos en múltiples ámbitos (Huxhold, 1991). Con ello se podría analizar como las zonas desequilibradas pueden integrar su red de transporte en los principales ejes de desarrollo económico, mejorando su competitividad en el conjunto global del sistema, y permitiendo que todos sus habitantes posean las mismas oportunidades para participar en su desarrollo sostenible. La accesibilidad se convierte en uno de los mejores aliados para conseguir realmente obtener una **justicia espacial**³², entendida como la aspiración a alcanzar un territorio más equitativo, justo y sostenible para quienes lo habitan. Los planificadores de transporte utilizan cada vez más los enfoques basados en la accesibilidad, calculada mediante SIG, como herramienta de análisis del impacto territorial (López, Monzón, Ortega, & Quintana, 2009).

La cobertura territorial de cada tipo de dotación y equipamiento dependerá de la existencia de una red que equilibre el grado de calidad de las comunicaciones y las relaciones entre los nodos de conexión. Dupuy (1987)³³ defiende que es “el desarrollo socioeconómico y demográfico de un espacio, el que posibilita un reacondicionamiento de las redes, evolucionando éstas como resultado de dichas variables”. A medida que el grado de desarrollo de una sociedad evolu-

ciona, se precisa de una red de transporte distinta en términos de cohesión, complejidad, jerarquía y accesibilidad. El viario va transformándose tanto en sus características técnicas como en su propia configuración, en función del crecimiento social y la evolución económica de las zonas a las que sirven. Existe una relación directa entre la estructura de la red con el equilibrio territorial a que dé lugar. W. Bunge³⁴ (1973) muestra en su teoría de la red de longitud mínima, que la estructura y desarrollo de la red depende del grado de desarrollo técnico y económico de la región. A partir de un estudio de la red en el que se analizase su distribución, su configuración y la funcionalidad que aporta al territorio, se podría tener una idea del grado de desarrollo de la región estudiada. Una excesiva longitud en los trazados de las vías de unión entre los núcleos origina graves fallos en las comunicaciones, disminuyendo los potenciales de progreso que tenga la zona. Además repercute negativamente en aspectos sociales de la población afectada dentro de la sociedad en la que se integra, quedando discriminada y apartada de los avances y mejoras en las zonas mejor conectadas, y limitando por tanto, su grado de participación en el desarrollo de la comunidad. La importancia territorial de la red viaria es tal que algunos autores llegan a definir la accesibilidad como el principal producto del sistema de transporte (Schürmann, Spiekermann, & Wegener, 1997).

Las importantes diferencias técnicas de los distintos tipos de viales, y el grado de interacción entre ellos y el territorio en el que discurren, condicionan extraordinariamente el nivel de comunicación de cada región. Por este motivo, el enfoque del análisis recogido en esta memoria se centra en los factores funcionales de las infraestructuras viarias como estructuradoras del territorio para dar servicio a los habitantes de los núcleos que comunican, y en especial, en su función de accesibilidad.

3.1.1. Breve análisis histórico de la evolución de la red viaria

El estudio de la historia de los caminos nos muestra la necesidad que tiene el hombre de moverse por el territorio desde el principio de los tiempos. Como

³² Más información sobre el concepto de justicia espacial, puede encontrarse en David Harvey, *Urbanismo y desigualdad social*, 1992

³³ DUPUY, G. (1987): “Les réseaux techniques sont-ils des réseaux territoriaux”, *L'Espace Géographique* nº3, París. Citado por (Garrido Palacios, 1995).

³⁴ Citado en Potrykowski, M., & Taylor, Z. (1984). *Geografía del transporte*.



cualquier otro animal, los primeros seres humanos siguieron las rutas naturales en busca de alimentos, a través de los pasos más sencillos que les permitían sortear las dificultades del terreno. Sobre estos primeros caminos trazados por la naturaleza y los pasos del hombre, se fueron asentando los caminos artificiales contruidos a lo largo de la historia. La transformación de la red viaria de una región es el fiel reflejo de la evolución de un pueblo, dándonos idea de las circunstancias particulares de cada época. Toda la vida social, económica y política de un lugar en un momento histórico se recoge en su red de caminos, lo que nos permite determinar cuáles eran los centros de poder político, militar o económico, así como las relaciones existentes entre diferentes poblaciones.

La línea de la costa, la alineación de montañas, los montes elevados, los valles encajados y los ríos caudalosos, fueron límites y guías para los primeros caminos que seguían las divisorias de aguas a través de las rutas naturales, evitando el descenso y ascenso de los valles, y los cruces de los ríos. A esta red se le unía otra que permitía comunicar los valles con las montañas. Un análisis del cruce de las divisorias con la red fluvial pone de manifiesto que en esas intersecciones se encuentran los puentes más antiguos, romanos y medievales, confirmando que el camino más antiguo es el que recorre las divisorias de agua (Nárdiz Ortiz, 1992).

Serán los romanos quienes realicen una planificación viaria para extender su Imperio por prácticamente toda Europa, Oriente Medio y Norte de África, de forma que transportaban con relativa rapidez ejércitos desde Roma, y materias primas hacia esta ciudad, desde cualquier lugar conquistado. Sus recorridos, con tramos contruidos con unas calidades técnicas que hoy siguen estudiándose, unen sus lugares y ciudades estratégicas, del interior y de puertos costeros, combinando en ocasiones tramos marítimos o fluviales con los tramos terrestres. A lo largo de la Edad Media, la necesidad de un transporte para el abastecimiento de alimentos y mercancías va a transformar determinados caminos de ámbito local en rutas más frecuentadas entre los núcleos que se están consolidando, y los monasterios, que tienen que dar salida a sus excedentes agrarios. Las razones comerciales, y los sentimientos religiosos,

generan nuevas rutas hacia lugares significativos, como el desarrollo del Camino de Santiago hacia la ciudad compostelana a partir del siglo IX, tras el descubrimiento de la supuesta tumba xacobeá. Las actuaciones constructivas de la época se limitaron a labores de pavimentación, ensanche, o rectificación de curvas y pendientes para adaptar los caminos medievales a los nuevos sistemas de transporte. Este hecho se manifiesta en los caminos más frecuentados por la existencia de ferias y mercados, en los cuales se demandaban caminos de rueda en sustitución a los de herradura.

En España hubo que esperar hasta el siglo XVIII, durante el reinado de Carlos III, y bajo los consejos de los ilustrados como Esquilache y Floridablanca, especialmente este último, para que se sintiese la necesidad de crear una red de caminos para permitir el contacto entre las ciudades, las villas y las aldeas, como elemento del desarrollo regional. Estos caminos reales³⁵ del siglo XVIII, recogidos en la cartografía de la época, nos describe la estructura de la red sobre la que actuarán las carreteras del siglo XIX, para corregir los muchos problemas y defectos para el transporte rodado entre otras razones por su mala o nula conservación. Mapas como los de Tomás López y Domingo Fontán, muestran como estas carreteras respetaron, en la mayor parte de los casos, los nudos viarios condicionados por la geografía y por los núcleos de población.

Durante el siglo XIX el proceso de transformación de la red viaria se acelera, y la mayor parte de las carreteras más importantes de la red viaria provincial estaba realizada o en ejecución durante este siglo. La capacidad de transformación de la nueva red no se limita a una traza y a un firme adecuado para los nuevos vehículos, sino que las carreteras se constituyen en elementos decisivos en la transformación del territorio, sirviendo de soporte para el crecimiento de las ciudades e integrándose en muchos casos como calles de los nuevos ensanches que consolidaban las urbes más importantes.

Durante el comienzo del siglo XX se mantienen las vías de épocas pasadas, completando algún tramo y mejorando sensiblemente sus características téc-

³⁵ Ya los egipcios y los griegos llamaron caminos reales a aquellos de interés general (Aguilar Civera, 2010).

nicas, más adecuadas para el mayor volumen de transporte que deben soportar. Con el desarrollo del automóvil la articulación de las comunicaciones terrestres se realiza en torno a las vías nacionales, que en muchos casos siguen antiguos ejes del viario romano. El olvido de las redes locales, deja amplias zonas prácticamente incomunicadas, por encontrarse lejos de las principales vías de ámbito nacional. Y sólo será a partir de los años 80, con la transferencia de competencias en materia de carreteras a las Comunidades Autónomas, y especialmente a partir de la década de 1990, cuando se comiencen a planificar actuaciones encaminadas a paliar las notables carencias de las infraestructuras viarias. Debe entenderse que las carreteras constituyen un patrimonio y un recurso considerable que la colectividad ha heredado de las generaciones pasadas y presentes (Madelín, y otros, 1999). Y así lo deben entender las planificaciones para conseguir una buena conservación y eficiencia de la red viaria, y en donde los análisis de accesibilidad son un elemento clave para establecer el modelo territorial que deben potenciar las nuevas inversiones.

3.1.2. Definición de carretera

En el *Diccionario General de Arquitectura e Ingeniería*³⁶ de Pelayo Clairac y Saenz de 1877, el término “carretera” se define como “camino público, firme, ancho y espacioso construido por el arte, con arreglo a la ciencia, por donde se efectúa la cómoda circulación de carruajes”. Esta definición nos acerca a elementos imprescindibles para entender este tipo de infraestructuras. En primer lugar nos habla de su **carácter público**, lo que confiere al viario una consideración de interés general para el desarrollo y la convivencia de un país. También hace mención a la necesidad de **aplicar técnicas científicas** en su construcción, lo que lo diferencia claramente de otro tipo de viarios que aparecen por el paso continuado sobre un mismo recorrido. Además considera que el efecto de la carretera ha de servir para una **circulación cómoda** de los carruajes, entendi-

³⁶ Extraordinaria obra inacabada (faltan de las letras Q a Z) de recopilación de técnicas y elementos relacionados con la construcción, elaborada entre el último cuarto del siglo XIX y primera década del XX. En 2010 el Ministerio de Fomento, a través del CEDEX-CEHOPU, publicó una versión digital de este diccionario gracias al trabajo de (Aguilar Civera, 2010)

dos como cualquier vehículo susceptible de aplicarse al transporte de personas y cosas (Aguilar Civera, 2010). En la definición empleada, por lo tanto, se da a entender que estas construcciones no sólo deben garantizar un servicio de comunicación entre dos lugares, sino que además debe cumplir unos requisitos de calidad para sus usuarios, con un firme y un ancho adecuado para un tránsito confortable por ellas.

Estos elementos son los que diferencia la carretera del camino. La definición de camino en el mismo diccionario lo considera como “parte del terreno de mayor o menor longitud y latitud destinada al tránsito de personas, animales y carruajes, y que tiene por objeto poner en comunicación dos o más puntos, estableciendo un medio de trasladarse de uno a otro con más o menos rapidez y economía”. No aparece aquí el carácter público, y aunque normalmente también lo tiene, nos encontramos con innumerables caminos privados en nuestras regiones. Tampoco se menciona los criterios técnicos para su construcción, y las condiciones de calidad desaparecen, trasladando las consideraciones de rapidez y economía de la comunicación al medio de transporte, y no a la vía. Sin embargo, es en esta definición de camino donde se asigna el objeto o función del viario, que no es otro que el de comunicar varios lugares separados espacialmente. La definición de carretera obvia esa circunstancia, al considerar esta infraestructura como un tipo de camino con ciertas particularidades y especificidades técnicas. De hecho, una primera diferenciación de los caminos la constituye la calzada³⁷, en donde se empedraba y revestía de firme, levantando el camino de la superficie del terreno para asegurar el tránsito en cualquier época del año.

La Real Academia Española define actualmente carretera como el “camino público, ancho y espacioso, pavimentado y dispuesto para el tránsito de vehículos”. El término de calzada hoy sigue manteniéndose para designar un ca-

³⁷ Calzada proviene del término latino *calcare*, que significa pisar, denominando *calciata*, al *camino empedrado*. Aunque se atribuye a los cartagineses ser los primeros que empedraron los caminos (Aguilar Civera, 2010), serán los romanos quienes conviertan estas infraestructuras en verdaderos monumentos en la historia del transporte y del desarrollo socioeconómico y cultural en occidente.



mino pavimentado y ancho, aunque también para designar la parte central dispuesta para la circulación de vehículos en las carreteras³⁸. Como se aprecia, la definición actual moderniza la expresión carruaje, sustituyéndolo por vehículo. Además incorpora la característica de que el camino debe estar pavimentado, constituyendo esta propiedad una condición indispensable para entender las carreteras en nuestra sociedad. Desgraciadamente la valoración de la calidad de la vía para asegurar una circulación cómoda, desaparece, quizás por entenderse que las carreteras actuales cumplen sobradamente con la apreciación de comodidad que entendían los viajeros del siglo XIX.

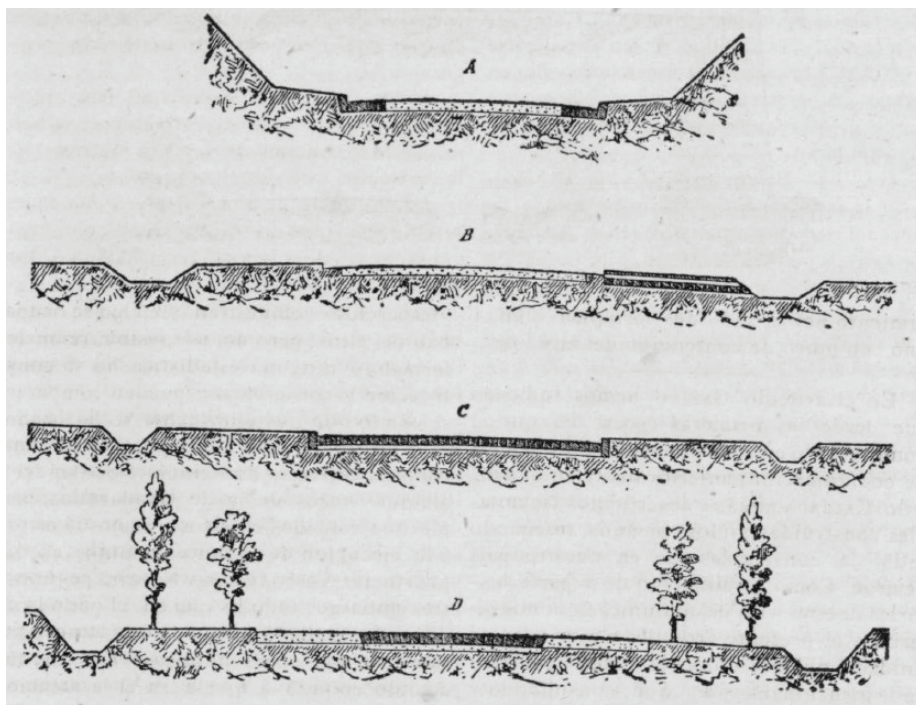


Figura 16. Diferentes tipos de secciones de carretera recogidos en el *Diccionario General de Arquitectura e Ingeniería* de Pelayo Clairac (Aguilar Civera, 2010)

³⁸ Una de las acepciones recogidas por la Real Academia Española para la palabra “calzada”.

Los lugares a unir y por donde debe pasar son marcados por decisiones políticas, comerciales o estratégicas, siendo labor del técnico buscar el mejor trayecto entre tales puntos, como analizaremos en apartado siguiente, y sus características técnicas más adecuadas para la función que deban cubrir. La legislación suele establecer una jerarquización en las infraestructuras viarias para diferenciar las que unen con grandes ciudades y lugares logísticos de importancia estratégica, de aquellas que unen pequeñas urbes, y dejando en un nivel de importancia menor, las que comunican otro tipo de núcleos de población. Además determinan quienes son los organismos que deben atender a su gestión.

La Constitución Española, en su artículo 149.1.21 y 1.24, atribuye al Estado la competencia exclusiva sobre el régimen general de comunicaciones y sobre las obras públicas de interés general, cuya realización afecte a más de una Comunidad Autónoma. Tras la finalización del proceso de traspaso de funciones y servicios del Estado a las Comunidades Autónomas en materia de carreteras, se sustituye la Ley 51/1974 de Carreteras, por una nueva Ley de Carreteras (Ley 25/88, de 29 de julio), que trata de regular los variados aspectos del servicio viario, mediante normas que responden tanto a las nuevas exigencias técnicas y demandas de los usuarios, como a la realidad de la nueva organización territorial.

La legislación actual sobre carreteras define el concepto de carretera y regula los procesos de planificación, proyección, construcción, financiación, explotación, conservación y uso de las carreteras, poniendo las bases necesarias para la gestión de las infraestructuras viarias de un país o una región. Esta Ley española, con sus pequeñas modificaciones en años posteriores, actualiza las definiciones de las carreteras y formula una nueva clasificación y denominación de las mismas. En este sentido se consideran carreteras como vías de dominio y uso público, proyectadas y construidas fundamentalmente para la circulación de vehículos automóviles, concretando específicamente el tipo de vehículo que se espera en una carretera, frente al criterio abierto que hace la RAE en esta cuestión. La definición en la ley mantiene el carácter público

de las carreteras, y las condiciones técnicas siguen quedando de manifiesto al concretar la necesidad de un proyecto para la construcción de este tipo de vías.

En función de las características técnicas que posean las carreteras, se determinará en cierta medida, el nivel de funcionalidad que pueden llegar a desempeñar sobre un determinado territorio. Sus parámetros de diseño y de construcción harán que cada carretera se encuadre en una de los siguientes tipos³⁹:

- Autopistas: carreteras para la exclusiva circulación de automóviles, que no poseen acceso a las propiedades colindantes, no cruzan a nivel ninguna otra vía de comunicación, y consta de distintas calzadas separadas para cada sentido de circulación.
- Autovías: carreteras que, no reuniendo todos los requisitos de las autopistas, tienen calzadas separadas para cada sentido de la circulación y limitación de accesos a las propiedades colindantes.
- Vías rápidas: carreteras de una sola calzada y con limitación total de accesos a las propiedades colindantes.
- Carreteras convencionales: las que no reúnen las características anteriores.

El Real Decreto 1812/94, de 2 de septiembre por el que se aprueba el Reglamento General de Carreteras, especifica para las autovías y las vías rápidas, la obligatoriedad de carecer igualmente de pasos y cruces al mismo nivel. Actualmente la diferenciación entre autovía y autopista es cada vez más complicada de entender, y la denominación de vía rápida parece condenada a desaparecer por las connotaciones de aumento de velocidad que lleva asociado. Durante una época se denominaron a las carreteras con más prestaciones que las convencionales, como Vías de Altas Capacidades (VAC)⁴⁰. En los más re-

cientes documentos de planificación viaria, se consideran como **Vías de Altas Prestaciones (VAP)**⁴¹.

Algunas comunidades autónomas amplían la clasificación con algún otro tipo de carretera. En el caso de la Comunidad Autónoma de Galicia, el 15 de diciembre de 1982, por el Decreto 156/1982, la Xunta de Galicia asume las competencias en materia de carreteras no incorporadas a la red del Estado, cuyo itinerario se desarrolle íntegramente en el territorio de la Comunidad Autónoma, cumpliendo lo establecido en el artículo 148.1.5 de la Constitución española. El 14 de septiembre de 1994 se publica la Ley 4/94 de Carreteras de Galicia que trata de regular el servicio viario respondiendo a las particularidades características de distribución de la población en esta región. A la clasificación anterior de las carreteras, se le añade un nuevo tipo con la Ley 7/02, de 27 de diciembre, de medidas fiscales y de régimen administrativo, que modifica algunos artículos de la Ley de Carreteras de Galicia, y que incluye la clase de carretera denominada:

- Corredor: carretera con limitación de accesos desde las propiedades contiguas, constituidas por una sola calzada, pero proyectada con previsión de su futuro desdoblamiento.

Las funciones de movilidad y de accesibilidad que deben garantizar las carreteras, permitiendo un acceso rápido, cómodo, eficiente y seguro a los lugares geográficos de interés, requiere una especialización del viario. Así unas vías atenderán fundamentalmente a satisfacer la demanda de movilidad, mientras otras infraestructuras viarias se ocuparán principalmente de garantizar el acceso a prácticamente cualquier punto de territorio. De acuerdo a las competencias particulares de cada administración responsable de las infraestructuras viarias, los diferentes planes y programas de carreteras del Estado, de las Comunidades Autónomas y de las Entidades Locales deberán coordinarse entre sí, para garantizar la funcionalidad esperada del sistema viario, y armo-

³⁹ Clasificación de las carreteras realizada en la Ley 25/88 del Estado.

⁴⁰ Podemos encontrar esta denominación en el *Plan de estradas* de 1991 elaborado por la Xunta de Galicia.

⁴¹ Podemos encontrar esta denominación en el Plan Move de 2010 elaborado por la Xunta de Galicia. http://www.cptopt.xunta.es/portal/webdav/site/cptopv/shared/es/pdfs/dxop/Planes%20actuacion/Plan%20MOVE/PLAN_MOVE_texto_integro.pdf



nizar los intereses públicos. Estos planes de carreteras comprenderán las previsiones, los objetivos y la programación de actuaciones a realizar en el viario, así como la clasificación de las carreteras en redes de diferente funcionalidad o jerarquía, como describiremos en el siguiente apartado.

3.1.2.1. *Análisis de las titularidades de carreteras*

Las titularidades de las carreteras que dan servicio al ciudadano fundamentalmente son de carácter estatal, autonómico, provincial y municipal. Cada uno de los organismos públicos titulares de estas infraestructuras gestiona el viario que le corresponde de acuerdo sus competencias. Cada administración debe aprobar la relación de las carreteras de las que son titulares, para poder realizar una adecuada gestión y planificación de las mismas, así como para establecer la coordinación precisa entre ellas. La Red de Carreteras del Estado (RCE), dependiente del Ministerio de Fomento, tiene la función de articular en una malla cerrada y homogénea, los flujos que comuniquen entre sí las comunidades autónomas, los tráficos de largo recorrido y el acceso a puertos, aeropuertos y puntos fronterizos de interés general. La Red Autonómica, cumple las mismas funciones que la red estatal pero en el ámbito de cada Comunidad Autónoma, articulando todos los centros de producción y actividad existentes en su territorio. Posibilita además las relaciones interiores entre las distintas áreas territoriales y núcleos de importancia, mediante la jerarquización de la red viaria autonómica, que en el caso de Galicia⁴² se clasifica en tres niveles:

- Red Primaria Básica: formada por grandes ejes que constituyan una malla cerrada con la RCE, completando una red viaria que integra la Galicia costera con la interior, vertebrando áreas territoriales a escala interprovincial, y en relaciones con comunidades vecinas y Portugal que no son articuladas mediante la red del Estado.

⁴² En este, y en otros ejemplos mostrados, pondremos datos concretos de Galicia o de alguna de sus provincias, simplemente para que sirvan de apoyo al razonamiento que se presenta en el texto. Usar datos de otras regiones, aunque sean diferentes, también cumplirían con el objetivo que se pretende en este capítulo de mostrar la funcionalidad de las infraestructuras viarias.

- Red Primaria Complementaria: será la que garantice la comunicación de los puertos y los centros de actividad económica que queden fuera de la red primaria básica, así como itinerarios alternativos a ésta. Esta red sirve de conexión entre los núcleos de población de mediana importancia con su cabecera de comarca o con itinerarios principales.
- Red Secundaria: conecta las redes superiores y permite el acceso a lugares y centros de interés turístico o de patrimonio histórico-artístico, que no están comunicados por las redes anteriores.

La red autonómica suele presentar una estructura mucho más densa que la estatal, con mayor concentración de vías en las áreas donde la RCE no llega. Por su parte, la Red de la Diputación Provincial sirve de complemento a la red autonómica en las comunicaciones intercomarcales. Une entre sí los municipios colindantes de cada zona, y posibilita el acceso de los núcleos más pequeños y la población dispersa a los ejes de comunicación de mayor capacidad. Aunque normalmente presenta una distribución espacial sin conexión entre sus carreteras y con una escasa continuidad de los recorridos provinciales, salvo en ejes muy concretos, esta red cobra su verdadera importancia como complemento a las redes estatal y autonómica en cada provincia, llegando a lugares de interés comarcal y local.

La red viaria municipal es la más cercana a los pequeños núcleos para permitir recorridos locales, y completar la comunicación entre todas las entidades de población y lugares de interés pertenecientes a los municipios, facilitando el acceso con la cabecera municipal, donde se instalan por regla general los principales equipamientos y servicios básicos (educativo, administrativo, sanitario, judicial, económico, etc.). Esta red posee una complejidad, unas características y unas funciones dentro del territorio diferentes a las redes anteriores. Su longitud es muy superior al resto, al menos en Galicia, cubriendo prácticamente todos los lugares de la provincia. Aunque su ámbito principal es local, existen itinerarios históricos de gran longitud, que recorren parajes naturales de enorme interés, y sobre los que se sitúan numerosas construc-

ciones de importancia etnográfica, cultural y artística del patrimonio gallego, así como otros elementos históricos de gran valor, al margen del propio valor histórico que posee el camino en sí mismo como elemento individual. Todo ello constituye el generador de una riqueza social y económica todavía por explotar y disfrutar, siempre que se rija bajo los criterios de respeto por el medio ambiente y por un desarrollo sostenible para las futuras generaciones (Varela García, Infraestructuras viarias, 2007).

Para tener una cuantificación de lo que suponen estas titularidades sobre una región, presentaremos un ejemplo comparativo con los datos viarios de la provincia de A Coruña⁴³. La longitud total de carreteras y vías de España representa, según el único informe sobre la red viaria municipal publicado a nivel estatal por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento en 1998, unos 663.848 km (Marcos García & Rodríguez Cebrián, 1999). Ese estudio puso en evidencia que hasta ese momento, se obviaba en la gestión viaria estatal el dato de la red municipal, que supone entre el 70-80% de la red de cualquier comunidad (Galán Bueno, 1999). La descripción de las carreteras secundarias y locales no suele ser suficientemente tratada por los gestores de las infraestructuras viarias, siendo una parte fundamental del conjunto de elementos que atienden las necesidades de la colectividad (Ghellab, y otros, 1999).

En ese estudio, en cuanto a longitud total de carreteras, Galicia ocupa el cuarto lugar, con un 11,9 % del viario español, es decir, 78.991 km. discurren por la comunidad gallega. Por su parte, la provincia de A Coruña representa el 37% del viario de la comunidad de Galicia, lo que supone el 4,4% del total nacional. A Coruña y Lugo son las dos provincias españolas con mayor longitud de red viaria, siendo Coruña con 29.250 Km la que posee el viario más extenso. Comparada con el resto de provincias españolas, la red viaria en la provincia de A Coruña presenta una considerable disminución de los porcentajes en todas las redes de rango superior debido a la enorme longitud de carreteras de titularidad municipal que presenta esta provincia. De hecho los 25.011 km. de red local es el valor más alto de todas las provincias españolas, representando el

⁴³ Información extraída del estudio de (Varela García, Infraestructuras viarias, 2007)

5,1% del total de red municipal de España, y el 40,5% de Galicia. Estos porcentajes aumentan a 6,3% y a 41,5% si sólo tenemos en cuenta la red municipal interurbana, ya que en A Coruña, 22.772 km de la red municipal son tramos interurbanos, valor muy por encima de las provincias españolas que le siguen: Lugo con 14.874 km. y Toledo con 13.002 km.

En estudios propios de la Diputación Provincial, como es el Inventario Cartográfico de la Red Viaria Municipal (1998) o la Encuesta de Infraestructuras y Equipamientos Locales (EIEL), elaborada según metodología común para las diputaciones provinciales, con la colaboración técnica del Ministerio responsables de la coordinación de las diferentes Administraciones Públicas, se constata una menor longitud de esta red si únicamente se atiende a las carreteras locales que sirven de acceso a los núcleos de población. Al descartar todos los senderos y caminos que comunican zonas agrícolas o de monte, la cifra de red viaria municipal interurbana se queda en aproximadamente 16.361 km de viario interurbano municipal, valor igualmente relevante a nivel español, y longitud viaria ciertamente difícil de mantener y conservar, pues significa aproximadamente el 80% del viario de la provincia (Figura 17). (Ver datos de Anejo 1).

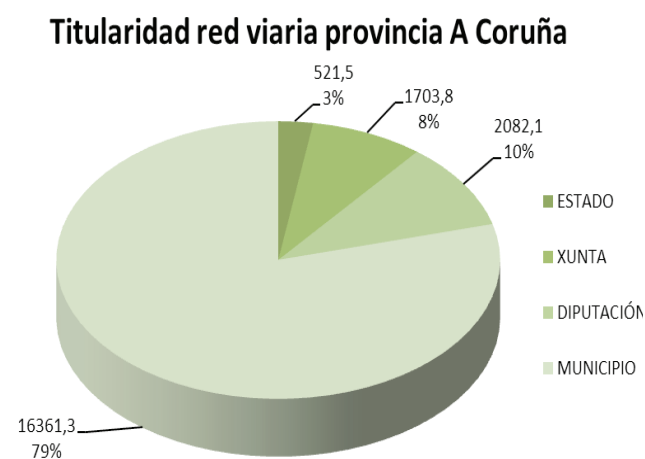


Figura 17. Distribución por km y % de la titularidad de la red viaria en la provincia de A Coruña según datos de la EIEL de 2005.



Si quisiésemos comparar los valores de la EIEL en provincia coruñesa con el resto de España, deberíamos extraer los datos correspondientes a los municipios de más de 50.000 habitantes, es decir, A Coruña, Ferrol y Santiago. En este caso los valores globales de la provincia quedan reducidos ligeramente, aunque los porcentajes apenas varían. Quizás como cambio más significativo se podría señalar la disminución en el valor porcentual de las carreteras del Estado, lo que refuerza la idea de que las ciudades son las verdaderas vertebradoras de la estructura viaria, concentrándose en ellas una longitud muy importante de la red mayor nivel jerárquico. También podemos apreciar como los valores de la red municipal de la provincia coruñesa representan el 30% de la red municipal española para los municipios de menos de 50.000 habitantes, según los datos que aportan cada una de las Diputaciones y Cabildos del Estado (Tabla 2). (Ver datos de Anejo 2)

Tabla 2. Titularidad de la red viaria en los municipios menores de 50.000 habitantes de la provincia de A Coruña según datos EIEL actualizados a 2005, comparados con los datos del resto de provincias españolas que realizaron la EIEL de 2000 (Varela García, Infraestructuras viarias, 2007).

TITULARIDAD DE LA RED (Municipios menores 50.000 hab)	ESPAÑA (Global)	ESPAÑA (Media)	PROVINCIA A CORUÑA	%
ESTADO	20.095,2	446,6	419,2	2,1
XUNTA	61.023,4	1.356,1	1.630,8	2,7
DIPUTACIÓN	59.204,2	1.315,6	1.997,6	3,4
MUNICIPIO	51.968,2	1.154,8	15.602,4	30,0
TOTAL (km)	192.291,0	4.273,1	19.649,9	10,2

Analizando los valores de las longitudes de cada uno de los organismos competentes, se aprecia como la media en las provincias españolas sólo supera al valor de la provincia en el caso de las carreteras del Estado. Destaca la cifra

de la red de la Diputación coruñesa que supera en más de un 50% a la media provincial en España, y especialmente del viario municipal, lo que sitúa a A Coruña a la cabeza de las provincias en cuanto a la longitud global de su red viaria, muy por delante de Lugo (14.147 km), Asturias (9.245 km) y Orense (7.272 km). En la red del Estado destacan Zaragoza, Huesca, Lugo y Burgos con más de 800 km de red estatal. En la red de la Comunidad Autónoma, Asturias, Murcia, Madrid y Granada sobrepasan los 2.000 km de red autonómica. En la red provincial, Lugo y León sobrepasan los 4.000 km, Burgos y Córdoba los 2.000 km, y luego les sigue A Coruña con una cifra muy cercana a ese valor. En el caso de la red municipal, se destaca la provincia coruñesa, doblando el valor de la siguiente provincia (Lugo con 7.373 km) y muy superior a la tercera provincia (Asturias con 4.811 km). Una tabla con todos los valores de este análisis se recoge en los anejos.

Si analizamos la distribución de las diferentes titularidades de las carreteras en cada uno de los municipios coruñeses podemos apreciar ámbitos territoriales con una mayor presencia de cada tipo de viario, frente a otras áreas donde destaca la falta o poca presencia de carreteras de una determinada funcionalidad y que puede influir en el desarrollo de esas zonas (Figura 18). En este caso se incluyen también los municipios de más de 50.000 habitantes, es decir, A Coruña, Ferrol y Santiago de Compostela. En los anejos se recoge una tabla con todos los datos de las longitudes de cada viario para cada municipio.

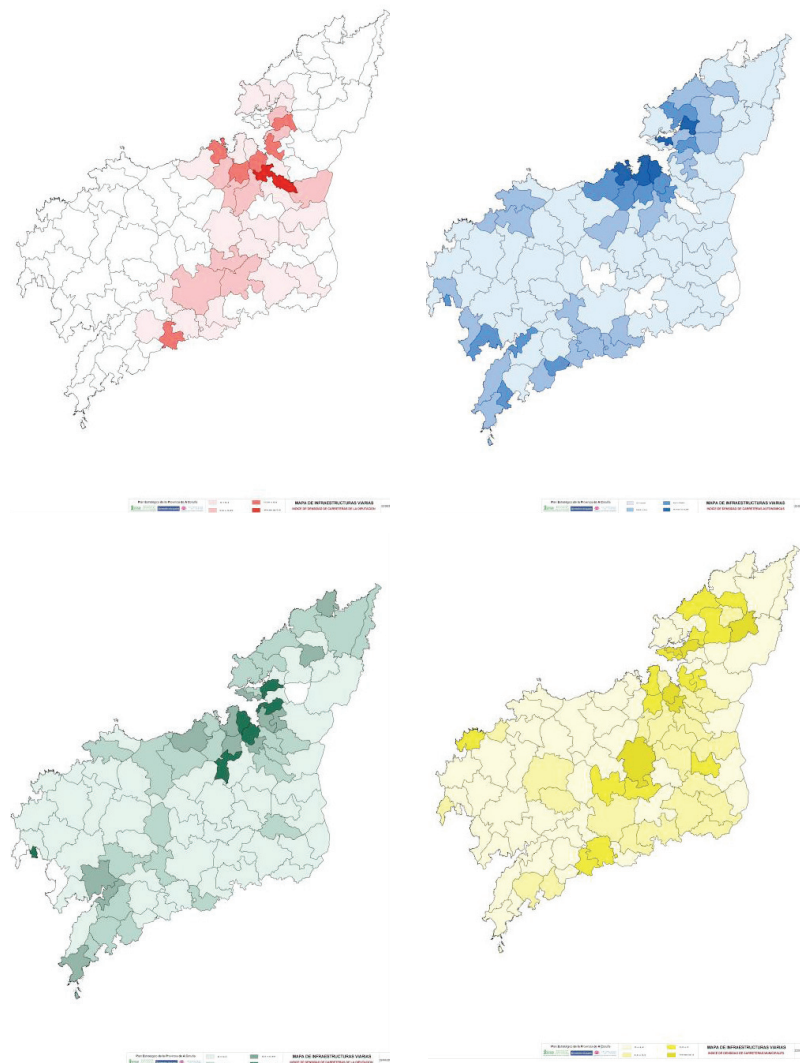


Figura 18. Densidad de longitud de la red viaria en función de la superficie de cada municipio, según la titularidad estatal, autonómica, provincial o municipal de las carreteras, a partir de datos de la Encuesta de Infraestructuras y Equipamientos Locales de 2005 en la provincia de A Coruña.

La importancia de la presencia de red viaria en los municipios de la provincia se aprecia claramente si analizamos toda la red existente, donde destaca la zona del Eje Atlántico, de forma similar a la estructura mostrada en el análisis de la red estatal, lo que refuerza la idea de que la presencia de una red de importancia estatal permite un mayor desarrollo de los municipios a los que sirve (Figura 19).

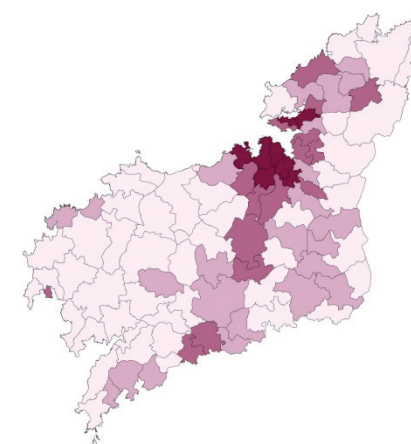


Figura 19. Densidad de longitud de la red viaria total en función de la superficie de cada municipio, a partir de datos de la EIEL de 2005 en la provincia de A Coruña.

Comparando los índices de densidad viaria por población y superficie entre varios países europeos, España, Galicia y la provincia coruñesa, tanto para el conjunto de la red interurbana como para las vías de dependencia municipal (Tabla 3), se aprecia como tanto Galicia como A Coruña obtienen unas cifras muy superiores a la media española y de los países europeos, situándose en cualquiera de los índices calculados entre los valores superiores. Destaca de manera especial el valor de la red municipal respecto a la población donde únicamente Irlanda presenta un valor similar, en este caso ligeramente superior. La provincia de A Coruña obtiene valores similares a los de Galicia, destacando de manera especial el valor del índice de densidad de superficie

para la red municipal, sin duda el más alto de toda España, con aproximadamente 2.8 km/km², seguida por Pontevedra con 2.5, Lugo con 1.5 y Alicante y Valladolid con 1.1 km/km².

Tabla 3 Comparación internacional de estándares de red viaria interurbana por habitante y por extensión superficial. Índices de densidad de la red viaria interurbana en función de la superficie territorial (índice de longitud, IL, km/km²) y según la población (índice de población, IP, km/1000hab). La información de otros países proviene de las estadísticas de la International Road Federation (IRF) y corresponde al año 1996, mientras que los datos españoles corresponden al informe del Ministerio de Fomento del año 1998.

	Total de la Red		Red de dependencia municipal	
	Km/1.000 habitantes	Km/Km2	Km/1.000 habitantes	Km/Km2
Alemania	7,75	1,77	6,18	1,41
Bélgica	14,20	4,69	12,79	4,22
Dinamarca	13,69	1,67	11,47	1,39
Francia	15,38	1,62	8,62	0,91
Grecia	11,22	0,89	7,25	0,57
Holanda	8,22	2,94	7,38	2,79
Irlanda	25,84	1,32	21,40	1,09
Italia	5,54	1,04	2,48	0,47
Portugal	6,36	0,77	--	--
Reino Unido	6,37	1,61	5,43	1,3
España	13,61	1,06	9,47	0,74
Galicia	26,21	2,43	20,14	1,83
A Coruña	24,33	3,40	20,51	2,86

3.1.3. Trazado geométrico de una carretera

En general la construcción de una carretera tendrá como finalidad unir aquellos lugares marcados por decisiones políticas, comerciales o estratégicas,

siendo labor del ingeniero buscar el mejor trayecto entre tales puntos. En principio se buscará la dirección recta y plana, pero debido a condicionantes orográficos, medioambientales, de expropiación, de seguridad para la circulación, de presupuesto, o de cualquier otra índole, es necesario ajustar la geometría de la carretera mediante una serie de alineaciones rectas enlazadas por alineaciones curvas, mediante arcos circulares de radios diferentes y curvas de transición que permitan una variación gradual en esta curvatura. Este trazado en planta de las infraestructuras viarias, se coordinará en el proyecto con su alzado sobre el terreno, con la finalidad de ir salvando las dificultades existentes, manteniendo unas buenas condiciones para la circulación rodada, y donde los parámetros de velocidad y de visibilidad serán fundamentales a la hora de conseguir una calidad adecuada de la geometría viaria. En cualquier caso, debe intentarse encontrar trazados que minimicen la longitud final de la carretera, y lo separen lo menos posible de la línea recta que une los lugares.

La plataforma de una carretera se apoya sobre la superficie terrestre creando un espacio tridimensional en su recorrido, en donde se considera la variación de la sección transversal de su diseño (calzadas, arcnos, cunetas, taludes, explanación, firmes, etc.) tanto en un plano horizontal como en un plano vertical. Aunque las técnicas informáticas de diseño gráfico y representación permiten realizar modelos digitales de las carreteras en 3D (Figura 20), lo habitual es hacer representaciones bidimensionales del trazado en planta y del trazado en alzado. El trazado en alzado está destinado para los técnicos que diseñen, proyecten o gestionen el viario. Sin embargo el trazado en planta, además sirve para que cualquier persona conozca el recorrido de una carretera, o de toda una red viaria en una región. Los mapas de carreteras son de uso común por el ciudadano, y cualquier mapa o cartografía de un territorio tiene a las infraestructuras viarias como una de las representaciones geográficas más importantes del mismo.

La definición geométrica del trazado en planta de una carretera se basa en la sucesión de líneas o alineaciones, combinadas de segmentos o tramos

rectos, curvos circulares o mediante curvas de transición denominadas clo-toides. En el diseño de carreteras se establecen las recomendaciones sobre distancias mínimas, tangencias, longitudes de curvas de transición, radios de circunferencias, ángulos de curvatura, y otros parámetros geométricos que sean adecuados para la garantizar y correcta combinación de estos elementos de forma que se consiga una circulación fluida de los vehículos que circulen por ellas.



Figura 20. Representación 3D del trazado de una alternativa de autovía en Galicia desarrollado desde el Videalab⁴⁴ de la Universidade da Coruña.

⁴⁴ http://videalab.udc.es/es/vt_autovias

En función de la escala de representación gráfica de la carretera sobre planos y mapas, la geometría de estas infraestructuras será diferente. Para escalas pequeñas, se identificará únicamente una línea que represente el eje de esta carretera, o dos líneas paralelas a ese eje separadas en función de la importancia de las mismas y la escala de representación, que también condicionará la representación de otros elementos asociados a ella como puentes, muros, etc. Desde el siglo XIX, donde se comienzan a representar con más criterio técnico las carreteras sobre mapas y planos, es habitual utilizar diferentes tipologías de líneas para identificar los tipos de viales o el estado en el que se encuentran. Así las líneas de trazos suelen señalar las carreteras en construcción, mientras las líneas de puntos las que están en proyecto, y las líneas de trazo continuo mostrarán las carreteras en funcionamiento. La utilización de colores permite diferenciar la clasificación o titularidad de los viarios, y dependiendo del tipo de plano o mapa, se utilizarán unos u otros, aunque normalmente se intentarán destacar más aquellas carreteras de mayor importancia mediante colores más fuertes o llamativos. El empleo de doble línea también permite identificar la tipología del vial, mediante el trazo que se asigna a cada uno de los bordes. Así por ejemplo, una línea de trazos y una continua representan caminos y viarios menores por lo que podría circular vehículos, mientras si es una continua y otra de puntos, se trataría de un camino vecinal, que podría no estar pavimentado.

Para escalas de detalle mayores, es necesario además representar otros elementos de la plataforma, como las calzadas, los arcenes, los límites de explanación, las líneas de cota, muros y obras de fábrica, obras de desagüe, obras de paso, y cualquier otro servicio o instalación de estas infraestructuras. En estos casos la carretera no se representará como un elemento lineal, sino como una superficie sobre la que se asientan multitud de elementos concretos e individuales en los que se puede descomponer la sección de una carretera.

3.1.4. Parámetros técnicos y funcionales de una carretera

Una nueva carretera requerirá el estudio sobre el terreno de su trazado, elaborando un levantamiento del mismo sobre planos, en donde se determinarán



los perfiles longitudinales y transversales, la cubicación de los movimientos de tierras, con el que poder hacer un proyecto y presupuesto para la construcción de todas las obras de tierra, de fábrica, de firme y accesorios necesarios (drenaje, cunetas, señalizaciones, etc.). En la gestión de las carreteras se contará con la misma información de las condiciones geométricas con la que ha sido proyectada inicialmente esta infraestructura, así como con todos los parámetros de operatividad y servicio una vez que entra en funcionamiento. En este apartado simplemente se quiere presentar el enorme número de variables que deben tenerse en cuenta al analizar una carretera. **Para tener un cierto orden entre todas las posibilidades que existen de clasificar los datos relativos a una infraestructura viaria, nosotros proponemos la siguiente (Tabla 4):**

Tabla 4. Clasificación de los parámetros de una carretera.

TIPO DE PARÁMETRO	SUBTIPO	CLASE	EJEMPLO
IDENTIFICATIVO			código, denominación, clasificación, localización, etc.
ENTORNO			travesía, población, etc.
TÉCNICO	GEOMÉTRICO	DIMENSIONAL	ancho calzada, arcenes, número de carriles, firme, etc.
		ESTRUCTURAL	peralte, curvaturas, pendiente, etc.
	OPERATIVO		señalización, obras de fábrica, equipamientos, instalaciones, etc.
FUNCIONAL	TRÁFICO		IMD, accidentabilidad, nivel de servicio, etc.
	SERVICIO		gestión de conservación y mantenimiento, obras, etc.

- **Datos identificativos:** Este tipo de datos sirve para identificar la carretera mediante su código, denominación, clasificación, y aspectos relativos a su titularidad y gestión, así como, aquellos parámetros que permiten definir el punto exacto dentro de su trazado, relativos al código de tramo, punto kilométrico o PK, distancia con respecto al origen y/o al punto de control anterior, sentido de circulación, etc. La localización de ese punto también puede estar identificada median-

te sus coordenadas UTM XYZ o sus coordenadas geográficas, que podrán llegar a ser el elemento identificativo más importante como veremos en el capítulo 4.

- **Datos del entorno:** Puesto que las carreteras son un elemento territorial y genera relaciones dentro de un ámbito geográfico, puede ser necesario identificar ciertos aspectos relativos a ese entorno, como por ejemplo la denominación de núcleos por los que pasa el trazado, identificando los tramos considerados como travesía; o señalando ciertos lugares de interés por los que discurre el trazado, marcando parámetros de impacto paisajístico que genera o de riqueza visual que ofrece, etc.
- **Datos de carácter técnico:** Se dividirá en dos tipos
 - **Datos geométricos:** también tendrá una subdivisión en dos apartados
 - **Dimensionales:** hace referencia a las dimensiones y medidas que presenta la sección transversal de la carretera, en cuanto al ancho de plataforma, de calzada, de arcenes, número de carriles, identificación de carril lento, de servicio o de acceso, etc.; así como a las características del firme, en cuanto a tipo, estructura de capas, etc.
 - **Estructurales:** identifica los parámetros relativos a la construcción de la geometría del trazado de la carretera, como son el peralte, la curvatura horizontal, la curvatura vertical, la pendiente, etc.
 - **Datos de operatividad:** son los relativos a elementos fundamentales para el funcionamiento de la carretera como servicio para los vehículos, pues integra todas las instalaciones, estructuras y equipamientos que lo hacen posible, como por ejemplo las marcas viales de los carriles, de los arcenes, las señales verticales, las obras de fábrica, los pasos elevados y subterráneos, los dispositivos de contención para vehículos, los drenajes, zonas de frenado, sistemas de seguridad, etc.

- **Datos de carácter funcional:** Se dividen en dos tipos
 - **Datos de tráfico:** incluyen todos los parámetros relativos a la ocupación de la carretera por parte de los vehículos, en cuanto a IMD, porcentaje de vehículos pesados, accidentabilidad, nivel de servicio, etc.
 - **Datos de servicio:** incluye toda la información necesaria para la gestión de los servicios de mantenimiento y conservación, como la ubicación de obras, cuestiones de vialidad invernal, expropiaciones, reclamaciones patrimoniales, etc.

3.1.4.1. Capacidad de una carretera

La capacidad de una carretera se refiere en general, al número máximo de vehículos que atraviesan una sección de la misma durante un periodo dado de tiempo en unas condiciones determinadas de la carretera y del tráfico. Dependerá por lo tanto de las características de la sección de ese viario y del grado de circulación existente. Su conocimiento es clave para una adecuada gestión y explotación de la red viaria, y como dato fundamental para el diseño y proyecto de nuevas carreteras.

Pese a ser un tema que se ha venido estudiando el tema desde 1920, especialmente desde los Estados Unidos, no se han desarrollado modelos teóricos generales para la capacidad de cualquier carretera, por lo que se usan métodos basado en datos empíricos. Especialmente se emplea el Manual de Capacidad de Carreteras o HCM (*Highway Capacity Manual*) desarrollado por el *Transportation Research Board* de los Estados Unidos, cuya primera edición es de 1950, y la más reciente de 2010.

En este método se propone el concepto de **nivel de servicio** como medida cualitativa de las condiciones de circulación, que tiene en cuenta varios factores como la velocidad, el tiempo de recorrido, seguridad, comodidad y costes de funcionamiento. Se plantean seis niveles de servicio (denominados desde la letra A a la F) de forma que cada uno identifique la calidad de la circulación, desde una circulación libre, continua y de gran comodidad para el conductor

(nivel de servicio A), hasta una circulación congestionada donde los vehículos avanzan muy lentamente debido a que el tramo esa carretera ha sobrepasado su capacidad (nivel de servicio F). La **intensidad de servicio** correspondiente a un nivel de servicio será el máximo número de vehículos que podrán atravesar una sección de carretera en una unidad de tiempo, sin sobrepasar ese nivel de servicio.

El Manual de Capacidad propone diferentes y variados métodos de cálculo para obtener los niveles de servicio en función del tipo de carretera (convencional o multicarril con calzadas separadas), según dirección, según tipo de tramo, etc. En estas operaciones intervienen gran cantidad de factores, dependiendo del cálculo a realizar, pero que básicamente se fundamentan en parámetros que dependen de la carretera y aquellos que dependen de la demanda del tráfico.

Con respecto a los primeros factores podemos enumerar algunos relacionados con la sección transversal y el trazado, como por ejemplo:

- Ancho del carril (fa)
- Ancho de arcén (fo)
- Pendiente de la calzada (fi)
- Número de intersecciones y accesos (fc)
- Porcentaje de prohibición de adelantamiento (fpa)

Cuando hablamos de las condiciones del tráfico se hace mención a las características cuantitativas y cualitativas de vehículos que atraviesan la carretera, como por ejemplo:

- Número total de vehículos en una hora, o intensidad (I)
- Porcentaje de vehículos pesados, diferenciando camiones, autobuses, vehículos de recreo (fvp)
- Distribución o reparto del tráfico entre carriles (R)
- Variaciones de la circulación durante periodos cortos, definidos mediante el Factor de Hora Punta (FHP)
- Habitualidad del conductor

Por poner un ejemplo de estos cálculos, sin entrar en números concretos, ni acudir a las innumerables tablas que se deben manejar, describiremos los pasos para obtener el nivel de servicio de una carretera convencional mediante la obtención de la velocidad media (VM), y suponiendo que no se dispone de un valor medido en campo para dicho parámetro. Las ecuaciones a emplear serían:

Ecuación 1

$$VM = VL - 0,0125 \cdot I_{eqv} - f_{pa}$$

Donde

VM es la velocidad media (km/h)

VL es la velocidad libre (km/h)

I_{eqv} es la intensidad equivalente (coches/h)

f_{pa} es el factor de corrección por efecto del porcentaje de prohibición de adelantamiento en ese tramo viario

Ecuación 2

$$I_{eqv} = \frac{I}{FHP \cdot f_i \cdot f_{vp}}$$

Donde

I_{eqv} es la intensidad equivalente (coches/h)

I es la intensidad de vehículos reales (coches/h)

FHP es el factor de hora punta

f_i es el factor de corrección por efecto del trazado y el terreno

f_{vp} es el factor de corrección por vehículos pesados y de recreo

Ecuación 3

$$f_{vp} = \frac{1}{1 + P_T (E_T - 1) + P_R (E_R - 1)}$$

Donde

f_{vp} es el factor de corrección por vehículos pesados y de recreo

E_T es el factor de equivalencia para camiones y autobuses

P_T es el porcentaje de tráfico de camiones y autobuses

E_R es el factor de equivalencia para vehículos de recreo

P_R es el porcentaje de tráfico de vehículos de recreo

Ecuación 4

$$VL = VLB - f_a - f_o - f_c$$

Donde

VL es la velocidad libre (km/h)

VLB es la velocidad libre básica (km/h) que puede asimilarse a la velocidad específica del tramo o la máxima autorizada si fuese menor

f_a es el factor de corrección por ancho de carril

f_o es el factor de corrección por ancho de arcén

f_c es el factor de corrección por número de accesos considerando intersecciones y accesos a viviendas que influyan en el tráfico

Conociendo la intensidad de tráfico y los diferentes parámetros de circulación y de las características técnicas de la carretera, se puede obtener la velocidad media VM (Figura 21), con la que se consigue averiguar el nivel de servicio a que corresponde entrando en una de las tablas del manual de capacidad.

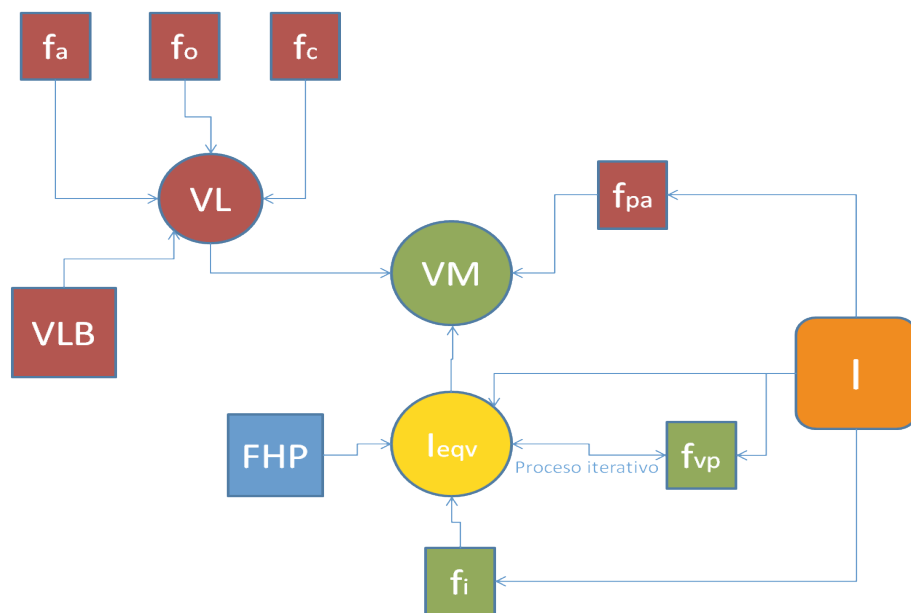


Figura 21. Esquema de las relaciones de cálculo de los parámetros necesarios para obtener la velocidad media VM con la que determinar el nivel de servicio para una carretera convencional.

3.1.4.2. Inventarios de carreteras

En la gestión de la red viaria, como en la de cualquier otra infraestructura, es fundamental disponer de un conocimiento detallado de todas sus características de cada uno de los elementos que componen la red, como los parámetros que comentamos anteriormente que describen una carretera. Para ello se recurre normalmente a la realización de inventarios de las carreteras, donde el objetivo fundamental es el conocimiento lo más exacto posible de la red, tanto en lo que refiere a sus características más permanentes como son plataforma, radio de las curvas, pendientes y demás parámetros geométricos como otras más temporales como son señales, balizamiento, semáforos, etc. (Fomento, 2010). Un objetivo secundario es que este inventario general sirva de base y referenciación para otro tipo de inventarios de las instituciones responsables

de carreteras (puentes, taludes, firmes, etc.). Cada carretera es identificada de forma conveniente y unívoca, mediante un código de calzada, de tramo, de kilómetro, de distancia y de sentido, o a través de variables similares. Sobre cada punto de cada carretera se dispone la máxima información de su geometría y equipamiento, incorporando datos muy diversos:

- Identificación del elemento (tipo carretera, código, titularidad, localización, principio y fin de tramo, si fuese preciso, calzada, ramal, vía de servicio, o clasificación funcional de ese tramo en la red, etc.)
- las características de la sección transversal (anchura de calzada, de plataforma, de arcenes, número de carriles, mediana si existe, bermas, etc.)
- las características del trazado (curvatura, peralte, pendiente longitudinal, distancia de visibilidad, acuerdos verticales, etc.)
- el pavimento (tipo, características superficiales y estructurales, etc.)
- las explanaciones (taludes de desmonte y terraplén, inclinación, altura, estado, etc.)
- el drenaje (longitudinal, transversal, subterráneo, etc.)
- el tipo de terreno (llano, ondulado, accidentado, muy accidentado)
- la señalización (horizontal, vertical, etc.)
- los elementos en las márgenes (dispositivos de contención de vehículos, alumbrado, balizamiento, etc.)
- las intersecciones (tipo, número de tramos, elementos auxiliares, etc.)
- las estructuras (puentes, muros, túneles, etc.)
- accesos, instalaciones, servicios, linderos, usos suelo, etc.

Como hemos visto, el volumen de información es tan elevado que normalmente se recurren a métodos semiautomáticos para obtener estos datos mediante un vehículo de inventario, o Vehículo de Medidas Geométricas (VMG), que lleva instalados diferentes dispositivos de medición: desde una cámara fotográfica y/o de video, a giróscopos, inclinómetros, odómetros, perfilómetros, acelerómetros, GPS, etc., hasta modernos dispositivos láser de escaneo



terrestre. Un inventario de carreteras, por lo tanto, es una herramienta básica para la gestión de una red viaria (Kraemer, y otros, 2003). La información en él contenida debe ser fiable, y es trascendental realizar un mantenimiento y actualización periódica de los datos. Muchas mediciones se almacenan directamente en la base de datos asociada al lugar geográfico donde se recogieron. Otros sin embargo deben tratarse posteriormente en gabinete, mediante la revisión y tratamiento de la información grabada en video. La localización exacta del lugar de la carretera al que corresponden los datos del inventario es un aspecto crucial, y ha permitido en los últimos años la incorporación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) a la gestión de la información viaria (Gonzalo Orden, 2004), simplifican los procedimientos de localización por tramo/nodo, tramo/pk, o similares, que se manejan en algunos inventarios.



Figura 22. Vehículo de medidas geométricas utilizado para el inventario de 2008 de la Red de Carreteras del Estado (Fomento, 2010).

Como ejemplo podemos mencionar la solución GM2 Inventarios en Carretera⁴⁵, perteneciente a la familia de productos de Geomobile Mapping desarrollados por la empresa Geograma, presenta interesantes posibilidades para dotar de datos a aplicaciones SIG enfocadas hacia la eficiente gestión de las carrete-

⁴⁵ <http://www.geomobilemapping.com/es/servicios/inventarios-carretera>

ras. Se trata de un producto que integra el fotografiado y escaneado láser de los distintos tramos que componen una carretera junto con el software que posibilita la gestión, para la realización de catálogos visuales de carreteras sobre los que tomar mediciones lineales y superficiales sobre panoramas de 360° tanto de la vía como sus posibles afecciones (taludes, árboles, ruinas...). Permite obtener gran diversidad de parámetros que afectan a las infraestructuras viarias, como cálculos de peralte, pendientes, análisis de estado de firme, digitalizaciones sobre los propios panoramas y elaboración de todo tipo de inventarios de activos, bien sea señalizaciones verticales, marcas viales, estructuras, etc..., siempre desde la perspectiva lineal de la vía y con referencia a su posicionamiento geográfico, bien por coordenadas XYZ, o bien mediante los hitos kilométricos de la calzada correspondiente.

Este tipo de aplicaciones, dentro del campo del inventario visual de características geométricas y equipamiento de carreteras, otorgan una enorme cantidad y variedad de información al gestor, de manera que puede realizar un inventario exhaustivo de estas infraestructuras, e ir completándolo con nuevas información a partir de las imágenes y los puntos de escaneo radar o láser que se pueden incluir en la captura de datos. El Catálogo Visual de Carreteras (CATVIS)⁴⁶ es un buen ejemplo. Se trata de una aplicación informática, desarrollada por GEOCISA en la idea de ser una herramienta de ayuda y apoyo para la Gestión de Carreteras tanto a nivel de conservación y mantenimiento como de proyectos, de forma similar a aplicaciones de otras empresas como AEPO.

CATVIS gestiona tres grandes bloques de información:

- una base de datos modular
- imágenes digitales reales de la carretera y su entorno, como visión desde la conducción de un vehículo.
- una cartografía de la zona

⁴⁶ GEOCISA (<http://geocisacarreteras.com>) desarrolla este sistema CATVIS del que encontramos un ejemplo concreto en la Xunta de Galicia a que pone a disposición del ciudadano parte de los datos de las carreteras autonómicas gallegas (<http://www.cmati.xunta.es/catalogo-de-estradas>)

La base de la herramienta la constituye la base de datos, que es susceptible de ser ampliada en función de las necesidades del usuario. En ella se recopilan una serie de valores que permiten definir sus principales características de los tramos de cada carretera: geometría, inventario, estructura de firmes, auscultación, obras de fábrica, accidentes, señalización, tráfico, gestión experta de firmes para la conservación y actuaciones, etc. El gestor o usuario de esta aplicación puede posicionarse en cualquier punto de cualquier tramo, y recorrer la carretera visualizándola mediante un simulador de vídeo sin tener necesidad de desplazarse a la misma físicamente. El paso o cadencia de visualización mínimo es de 10 m.

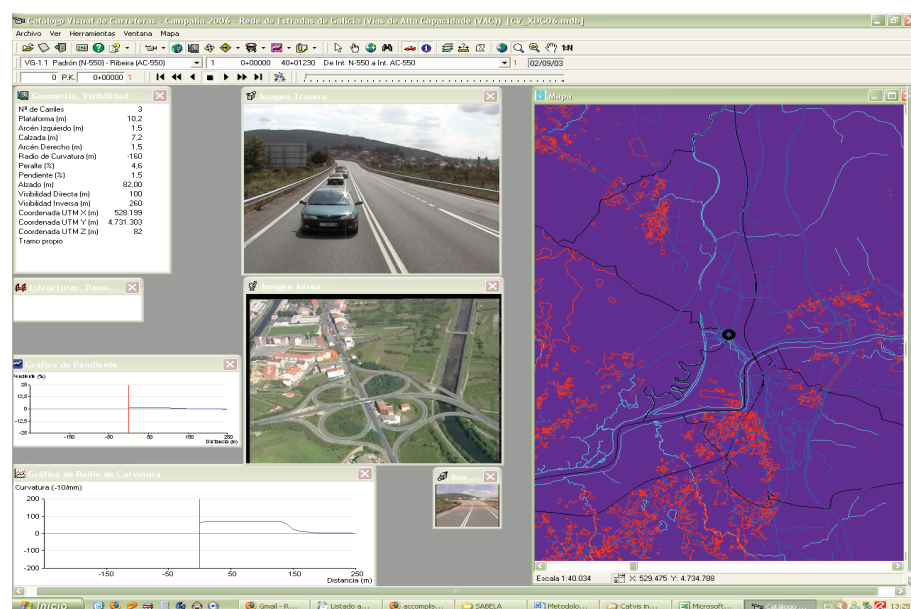


Figura 23. Interfaz del Catálogo Visual de Carreteras.

La base de datos modular está estructurada en una serie de tablas que recogen información general de las carreteras, como las que se describen a continuación:

- **A-Carreteras:** Contiene la información general de cada carretera (IdCtra, Código de carretera, Red y Subred, Pk Inicio y Final, Longitud, Denominación, Inicio y Fin, así como fecha de inventario de la misma)
- **A-Ctras-Provs:** Asigna a cada carretera la provincia a la que pertenece.
- **A-Tramos:** Identifica las calzadas de las carreteras (IdTramo, Código carretera, abreviatura, pk inicio y final, inicio y final del tramo, abreviatura nueva).
- **Geometría:** Almacena los principales parámetros de información geométrica, incluyendo las coordenadas UTM X, Y y Z de todos los puntos que componen la red viaria. Además de estas coordenada y de la identificación de cada punto mediante el punto kilométrico y la calzada a la que pertenecen se asignan en esta tabla parámetros como ancho de plataforma, de calzada, de arcenes, radio de curvatura, peralte, pendiente, alzado, visibilidad, etc.
- **Enlaces:** identifica los diferentes enlaces, mediante el código de calzada en la que se sitúan y el punto kilométrico dentro de esta. Se indica además si la situación del mismo (derecha, izquierda), la carretera con la que enlaza y su titularidad.
- **IRI:** identifica los valores del Índice de Regularidad Superficial, tanto derecho como izquierdo.

Además de éstas, existen en la base de datos, otras tablas diseñadas para almacenar una serie de parámetros que ayudan a completar la información referente a las carreteras. Se incluyen aquí características del entorno, estructuras y equipamientos viarios, señalización, hitos y marcas viarias, etc. La mayoría de estos parámetros se almacenan codificados según unos códigos establecidos en las tablas correspondientes.

Tabla 5. Listado de parámetros almacenados en las tablas de la base de datos de CATVIS.

Tabla	Parámetros que puede almacenar CATVIS			
Entorno	Desmontes Terraplenes Edificaciones Tipos de terreno Electricidad, telefonía, etc. Zonas de protección Rutas significativas Monumentos Muros Zonas montañosas	Hitos	Hitos Límites territoriales Aeropuertos Puentes de montaña Ferrocaril Ríos Vaguadas Puentes de mar	
	Equipamientos	Postes de socorro Tajeas Caños Pontones Bajantes Pasos salvacunetas Iluminación tronco Iluminación intersecciones Balizamientos Áreas Servicios Semáforos Vallas de cerramiento Isletas Pasos superiores peatones Pasos inferiores peatones Pasos a nivel peatones Biondas New jersey Mojones protectores Trief Pretilles	Marcas viales	Discontinuas (marca vial longitudinal) Continuas (marca vial longitudinal) Discontinuas-Continuas Continuas Discontinuas Flechas de dirección/selección Flechas de salida Flechas de fin de carril Flechas de retorno Carril o zona reservada Dirección Señales horizontales Cableado Delimitación de estacionamiento Paso a Nivel Comienzo carril reservado Prohibición parada o estacionamiento
Estructuras		Pasos inferiores carreteras y caminos Pasos inferiores ferrocarril Pasos inferiores ríos Pasos inferiores vaguadas Pasos inferiores peatones Pasos superiores carreteras caminos Pasos superiores ferrocarril Pasos superiores peatones Pórticos y banderolas Túneles Obras de fábrica	Señales verticales	Advertencia de peligro Prioridad Prohibición de entrada Restricción de paso Otras prohibiciones Obligación Fin de prohibición Indicaciones generales Carriles Servicio Preseñalización Dirección Identificación carreteras Localización Confirmación Uso específico poblados Paneles complementarios Otras señales
		Firmes	Estado del firme Tipos de pavimento Espesor de la capa de rodadura Tipos de arcén Tipos de cuneta Bermas de seguridad Aceras Sección transversal tipo	Tráfico
Poblaciones	Travesías Variantes		Vías	Duplicaciones Vías Variantes de población Variantes de trazado Carriles de espera Carriles de entrada /salida Carriles lentos

Al disponer de las coordenadas absolutas obtenidas con dispositivos GPS, la utilización de los SIG permiten incorporar y tratar todos los parámetros recopilados, lo que aumenta las posibilidades de manejo, representación y análisis de los datos viarios como proponemos en el capítulo 4. Pero antes vamos a profundizar en una de las funciones principales, sino la más importante, que debe suministrar una red de infraestructuras viarias, como es la accesibilidad del territorio.

3.2. Definición de accesibilidad

*"Accessibility... is... one of those common terms that everyone uses until faced with the problem of defining and measuring it"*⁴⁷

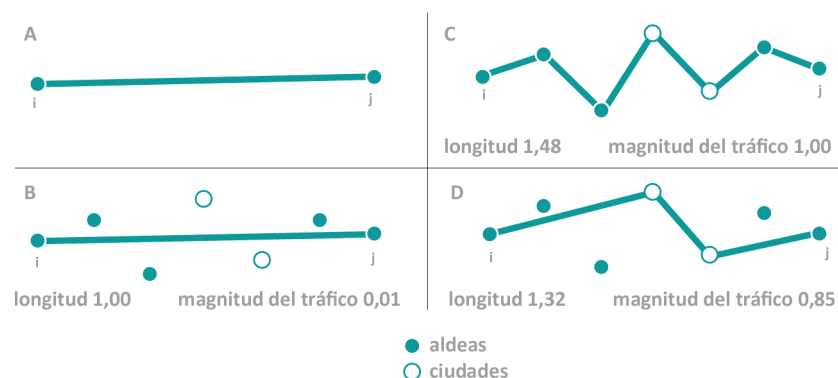
(Gould 1969, page 64)

El concepto de accesibilidad aporta un conjunto de técnicas de gran capacidad para abstraer la realidad y sintetizarla en unos resultados numéricos y cartográficos que reflejan la calidad de las comunicaciones de un territorio y son fáciles de entender por la opinión pública (López et al., 2009). Aunque la calidad del desplazamiento es de especial importancia para determinar la elección de los recorridos y de los medios de transporte a utilizar entre dos lugares, no es fácil determinar lo que significa la calidad de una comunicación, ni qué variable será la más significativa a la hora de cuantificarla.

El término accesibilidad hace referencia a un factor de interacción territorial, en donde generalmente las relaciones entre dos puntos aumentan en función de la disminución del coste de desplazamiento entre ellos, medido según la distancia o el tiempo consumido, o a partir de otros recursos empleados en establecer esa comunicación (económicos, energéticos, ambientales...) o de los efectos que esta comunicación genera (seguridad, comodidad...). Sin embargo, una buena accesibilidad entre los puntos extremos no indica que entre ellos y el resto del territorio, la accesibilidad sea adecuada. Debe considerarse

⁴⁷ Gould, P. 1969. Spatial Diffusion, Resource Paper No. 17. Washington, DC: Association of American Geographers. Citado por (Ingram, 1971) (Baradaran & Ramjerdi, 2001)

que una determinada ubicación geográfica posee infinidad de posibles conexiones con el resto del territorio, por lo que la accesibilidad territorial debería representar la calidad y diversidad de las comunicaciones que dispone un lugar (Galán Bueno, 1999). Al tener en cuenta todas las interacciones territoriales, la mejora de la accesibilidad entre dos puntos por la construcción de una nueva infraestructura lineal que los una, puede traer como consecuencias la disminución de la posibilidad de acceso a esos lugares desde puntos intermedios, y el empeoramiento de la accesibilidad transversal a lo largo del nuevo eje viario. Pero también puede ocurrir que el aumento de longitud en un determinado trayecto sea positivo por unir nuevas localidades que aumentan los flujos y ofrece nuevos y más diversos servicios. En estos casos el nuevo corredor será más eficaz en términos comerciales y económicos, como ya puso de manifiesto Wellington (1887)⁴⁸ en el estudio del ferrocarril a finales del siglo XIX. Además las inversiones en la red de carreteras de un determinado territorio generan efectos secundarios y producen beneficios en regiones vecinas (Gutiérrez, Condeço, & Martín, 2007)(López et al., 2009).



⁴⁸ Citado en (Haggett, 1967)

⁴⁹ HAGGETT, P., CLIFF, A. D. and FREY, A. (1977) Locational methods (London)

Aunque usualmente el término accesibilidad se entiende como la facilidad con la que un lugar puede ser alcanzado desde otros con un determinado sistema de transporte (Morris, Dumble, & Wigan, 1978), se trata como hemos visto, de un concepto complicado de definir (Joly, 1999; Gutiérrez Puebla, 2001; Salado García, 2004;...), y en el que intervienen muchos factores: la distancia física (Baxter & Lenzi, 1975)(Batty & Miller, 1996)(Van Herzele & Wiedemann, 2003) (Kwan, 2010) o cognitiva (Briggs, 1973; MacEachren, 1980)⁵⁰ entre los nodos a comunicar; el grado de atracción o rechazo de los mismos (Bosque Sendra & Moreno Jiménez, 2004); el interés social y/o personal que genera el desplazamiento (Handy y Niemeier, 1997; Levison, 1998;...)⁵¹, las infraestructuras y los medios de transporte existentes (Drew, Rowe, & Council, 2010; Olvera, Plat, & Pochet, 2003); la capacidad de movilidad (Loyola Gómez & Albornoz del Valle, 2009); los tiempos y costes parciales o totales del viaje (Duque, Pinto, & López, 2002)⁵²; etc.

Para calcular “el sumatorio de las oportunidades relativas de contacto e interacción espacial desde el conjunto del sistema” (Calvo Palacios, Jover, Pueyo, & Alonso, 1993), la accesibilidad debe atender especialmente a la localización y características de la red viaria (velocidad, capacidad, densidad, congestión, etc.), así como el potencial de oportunidades y de utilidad de los servicios territoriales (Garrido Palacios, 1995) y de los lugares geográficos que estas

⁵⁰ Briggs. (1973). Urban Cognitive Distance. In R. Downs & D. Stea (Eds.), Image and Environment: Cognitive Mapping and Social Behavior (pp. 361-388). Chicago: Aldine.

Briggs. (1973). On the relationship between cognitive and objective distance. In W. F. E. Preiser (Ed.), Environmental Design Research (Vol. 2, pp. 182-192). Stroudsburg, PA: Dowden, Hutchinson and Ross.

MacEachren, A. M. (1980). Travel time as the basis for cognitive distance. The Professional Geographer, 32(1), 30-36. Citados por (Pingel, 2009)

⁵¹ Citados por Salado García, M. J. (2004). Localización de los equipamientos colectivos. accesibilidad y bienestar social. En J. Bosque Sendra, & A. Moreno Jiménez, *Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*.

⁵² MARTÍN DUQUE, D.; CRISTOBAL PINTO, C.; GÓMEZ LÓPEZ, F.J. (2.002): Cobertura y Accesibilidad en transporte público en un corredor metropolitano: el corredor del Henares en Madrid. V Congreso de Ingeniería del Transporte CIT. Santander. Citado por (Subero Munilla, 2009)



infraestructuras unen. (Hansen, 1959) fue uno de los primeros en definir la accesibilidad como una medida de la intensidad del potencial de oportunidades para la interacción entre dos lugares, formulando un indicador en el que relacionaba el tamaño de la actividad atractora de una zona con el tiempo, la distancia o el coste generalizado del desplazamiento hasta esa zona.

La aplicación del concepto de accesibilidad a situaciones empíricas sobre una gran diversidad de asuntos ha creado un amplio abanico de definiciones y de acercamientos al término de accesibilidad que podemos encontrar en la literatura (Joly, 1999) como prueban los más de 50 casos diferentes que (Salado García, 2004) utiliza para intentar clasificar los distintos usos y componentes del término accesibilidad, o la amplia revisión de técnicas descritas por (Halden, Mcguigan, Nisbet, & Mckinnon, 2000). En función del enfoque que se pretenda abordar en un estudio de accesibilidad, cobrarán más importancia los aspectos locacionales⁵³ (*place accessibility*) centrados en la accesibilidad potencial de un territorio, o se atenderá también a los aspectos personales (*individual accessibility*) dirigidos a analizar la accesibilidad efectiva de cada individuo, en donde juega también un papel importante la percepción subjetiva del espacio, el tiempo y la calidad.

En el **enfoque inductivo** que atiende a cuestiones individuales, la accesibilidad deja de ser sólo un factor espacial y aparecen aspectos propios a la persona como son el nivel de renta, la formación, la edad, el modo de transporte, etc. que condicionarán su movilidad según la actividad que acometa en cada lugar y momento del día (laboral, esparcimiento, educativa, residencial, alimenticia, etc.). El tipo de actividad también determinará el grado de atracción entre los puntos origen y destino, lo que condicionará el número de viajes que se realicen, entre otros aspectos.

El **enfoque deductivo**, centrado en el espacio como elemento principal del análisis, es con diferencia el más estudiado desde que Von Thünen publicó en

1826 los primeros análisis sobre la localización agrícola, profundizando cada vez más para definir el coste que supone la distancia sobre la localización en el espacio de la mayoría de las actividades. Si bien en ocasiones se obtendrán valores absolutos de accesibilidad, lo más habitual es referirnos a valores relativos de comparación entre las diferentes zonas de una región, o entre diferentes regiones.

Sea cual sea el enfoque empleado, la accesibilidad se relaciona directamente con el concepto de distancia. Sin embargo, las nociones de proximidad y lejanía ya no se pueden referenciar únicamente a la idea de distancia o espacio absoluto, como tradicionalmente se ha estudiado la influencia de la distancia sobre ciertas actividades del ser humano (la teoría de localización industrial de Weber (1909); la teoría de los lugares centrales de Christaller (1933), la teoría de la demanda espacial de Lösch (1953), etc.). El desarrollo de los medios de transporte y la mejora de las redes de infraestructuras ha relativizado la distancia geográfica en función de los avances económicos y tecnológicos en cada época. El concepto espacial que marca la separación de dos lugares pierde sentido en la actualidad frente al concepto temporal, donde interesa la duración del desplazamiento entre un lugar y otro. La accesibilidad moderna, además del espacio geográfico, tiene en cuenta también el espacio relativo, donde el tiempo se constituye como el parámetro fundamental para entender la distancia. Incluso algunos autores llegan a definir la accesibilidad como una medida de los lugares alcanzados desde un punto en un tiempo dado al desplazarse por la red a una velocidad constante (Laarman⁵⁴, 1973; Hilbers, & Verroen⁵⁵, 1993).

Como veremos en el siguiente apartado, muchos de los indicadores usados para el análisis de accesibilidad atienden complementariamente a estos dos enfoques: por un lado el esfuerzo o coste empleado en el desplazamiento (en-

⁵³ El concepto "locacional" se emplea en Geografía Humana para referirse a los fenómenos o hechos relacionados con el posicionamiento y localización de los mismos, y su distribución sobre el territorio, tratando de superar lo concreto para alcanzar la generalización (Hagget, 1976).

⁵⁴ Citado en Potrykowski, M., & Taylor, Z. (1984). *Geografía del transporte*.

⁵⁵ Hilbers, H.D.; Verroen, E.J. (1993): Measuring accessibility, a key for successful transport and land-use planning strategies. PTRC Education and Research Services Ltd. Vol P863. Citado por (Subero Munilla, 2009)

foque deductivo), y por otro las diferentes oportunidades que ofrecen cada uno de los lugares de la región de estudio (enfoque inductivo). Ambos conceptos de oportunidad y de esfuerzo deberían ser considerados como elementos de la definición de accesibilidad (Martellato & Nijkamp, 1998), y así lo hacen (Koenig, 1980)⁵⁶ o (Monzón de Cáceres, 1988) al definirla como la facilidad de una zona para acceder a los diferentes centros de actividad de un ámbito determinado, incluyendo un factor motivante y un factor resistente al viaje.

Independientemente del tipo de enfoque empleado, los análisis de accesibilidad utilizan siempre un elemento fijo o soporte territorial sobre el que se produce el desplazamiento, y un elemento móvil o medio de transporte que permite moverse sobre ese espacio geográfico. El movimiento dentro un territorio está condicionado por las características del terreno por el que se transita, y por las condiciones del medio físico o modo de transporte empleado para conseguir el desplazamiento. Tanto el tipo de terreno como el modo de transporte, establecerán facilidades y restricciones en los movimientos, lo que repercutirá en los costes generados durante los desplazamientos. La conjunción de ambos factores gracias a los modelos de accesibilidad, define la calidad de los recorridos entre distintos lugares, lo que permite diferenciar cuáles son las áreas potencialmente con mejor y peor comunicación respecto al resto de zonas de una región.

Las aplicaciones de cálculo de accesibilidad sobre Sistemas de Información Geográfica (SIG) atienden fundamentalmente a estos criterios, bien directamente o mediante una serie de operaciones básicas secuenciadas (Salado García, 2004), y sobre ellos centraremos el interés en esta investigación. No entraremos por tanto en los parámetros que rigen el enfoque inductivo de las relaciones de accesibilidad entre distintos lugares territoriales, ampliamente abordados desde la geografía cuantitativa. En este trabajo adoptaremos el concepto de accesibilidad potencial (Galán Bueno, 1999) como referente para analizar las posibilidades que ofrecen las infraestructuras y características de

⁵⁶ KOENIG, J.K. (1980): Indicators of urban accessibility. Transportation, vol 9. Citado por (Subero Munilla, 2009)

un territorio para comunicar cualquier punto del mismo con el resto de lugares de esa región. Por lo tanto, la accesibilidad territorial será entendida como la cuantificación del grado de conexión que tiene un lugar para poder desplazarse a cualquier otra ubicación del territorio analizado, gracias a las infraestructuras y a los medios de transporte considerados.

3.3. Indicadores geoespaciales de accesibilidad

Los indicadores geoespaciales de accesibilidad representan la posición de los elementos territoriales en torno a su contexto geográfico. Describen la localización de un área con respecto a las oportunidades, actividades o servicios existentes en otras y en ella misma, entiendo “área” por región, ciudad o corredor (Eskelinen, H., Grasland, C., Schoen, P., 1998)⁵⁷.

Desde que Von Thünen⁵⁸ expresara, a comienzos del siglo XIX, la accesibilidad en función de los costes del transporte de los productos del campo a la ciudad sobre un espacio isotrópico, este concepto se estudió desde muy diversos puntos de vista, asociando los distintos factores que intervienen en las relaciones territoriales. Muchos autores han tratado de caracterizar el territorio en relación a un factor dominante físico o humano, sistematizando el espacio geográfico a través de diversas hipótesis y teorías sobre la configuración de su estructura espacial y económica. En general estos sistemas se basan en la configuración del movimiento de las personas y los bienes en ese territorio, la estructura de las redes de transporte y comunicaciones existentes, la configuración de la red de poblaciones y la distribución de los fenómenos socioeconómicos que se generan (Z. Chojnicki, 1970)⁵⁹.

⁵⁷ ESKELINEN, H., GRASLAND, C., SCHOEN, P. (1998) *Synthesis of Proposals for the Construction of Geographical Position Indexes*. Report of S.E.P.S. Working group I.1, 1st Draft, February 1998. Citado por (Joly, 1999)

⁵⁸ Von Thunen, J (1826): *Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie*, G. Fischer, Jena. Citado por (Tobler, 1993)

⁵⁹ Citado en Potrykowski, M., & Taylor, Z. (1984). *Geografía del transporte*.



Aunque se plantean diferentes metodologías para el cálculo de accesibilidad en función de diversas variables que condicionan, en mayor o menor medida, este proceso de conexión territorial, en este proyecto de investigación, como ya hemos indicado en los objetivos, nos centraremos fundamentalmente en la estructura de la red viaria. Los principios básicos que rigen la formación de las configuraciones de comunicación fueron clasificados en 1968 por I. Tarski⁶⁰ de modo que la geometría de red de transporte se basa en la tendencia de cada lugar a tener un enlace con los demás puntos de la red (principio de continuidad); buscando formar conexiones lo más cortas posibles (principio de braquilogía) y, generando un grado de importancia en las líneas de transporte en función de las poblaciones que conecte cada vía (principio de jerarquización), llegando a unir varias comunicaciones en una principal (principio de consolidación).

La mayoría de los modelos teóricos sobre la geometría de las redes de transporte se basan en la geometría rectangular, hexagonal o triangular, intentando reducir al mínimo la relación entre la longitud de la red y la superficie del espacio al que sirve. Ya en 1850 J.G. Kohl intenta esclarecer la influencia que ejercen las diferentes formas de la superficie de la tierra sobre la comunicación y la configuración de las poblaciones. El análisis de las características de las figuras geométricas y del transporte permite formular ciertas leyes generales, como lo demuestran los trabajos de distintos investigadores durante el siglo XX. W.H. McLean propone en 1930 una configuración rectangular para los territorios coloniales, en donde las confluencias de las líneas de comunicación coincidían con la localización de las ciudades, y el tamaño de los núcleos dependería de la categoría de las líneas que lo cruzasen. C. Kehr desarrolla un proyecto de red para los Estados Unidos mediante triángulos cuyos vértices correspondiesen a poblaciones del mismo orden. A. C. Comey desarrolla una configuración hexagonal, llevando el modelo incluso al interior de las ciudades. H. Haufe demuestra la ventaja de esta configuración en las estructuras espaciales, analizando el valor máximo de la relación entre la superficie y el perímetro, y también en la cobertura de toda la superficie esférica del planeta.

⁶⁰ Citado en Potrykowski, M., & Taylor, Z. (1984). *Geografía del transporte*.

La figura que mejor cumple la primera condición es el círculo, y para la segunda será el triángulo esférico del octante de la esfera formado por las proyecciones de tres ejes de la esfera perpendiculares entre sí. Se verifica que la figura que mejor cumple los dos condicionantes a la vez es el hexágono. Cuando la superficie de esta figura es homogénea, la manera más económica de cubrirla será mediante tres líneas rectas que unan sus vértices, transformando la red hexagonal en triángulos equiláteros.

El desarrollo de las ciudades, su sistema económico y comercial y el progreso técnico de cada sociedad incrementa las necesidades de transporte y de especialización del mismo, aumentando las distancias en los recorridos, como ya estudiaron Taaffe, Morrill y Gould (1963) o R. Lachene (1965) entre muchos otros investigadores. R. Domanski (1963) comprueba que el modelo hexagonal deja de ser óptimo en las proximidades de las rutas de comunicación principales. Según que la distancia a la vía principal aumenta, las distorsiones disminuyen y la red de las vías secundarias tiende a una configuración de triángulos equiláteros o de cuadrados (Figura 25). Domanski desarrolla un modelo anisotrópico, planteando condiciones más próximas a la realidad, al emplear un espacio no homogéneo, diferenciando el transporte desde el punto de vista técnico y económico, y usando una configuración de la red dinámica, de forma que crezca gradualmente.

Desde el siglo XIX diversos modelos teóricos como los comentados, nos ayudan a comprender la coherencia entre el sistema territorial definido y el funcionamiento y desarrollo de la red viaria. Estos modelos tratan de explicar las transformaciones de la red y sus causas mediante el uso de esquemas abstractos que se desarrollan en expresiones matemáticas, los cuales a partir de diferentes modelos, métodos, índices, parámetros e indicadores, pueden determinar la coherencia de una red de transporte. Conocer nivel de desarrollo de una configuración viaria, desde el punto de vista jerárquico y de accesibilidad, nos permite evaluar la articulación territorial provocada por los ejes de transporte y la calidad de las comunicaciones que estos generan. La aplicación del concepto de accesibilidad a situaciones empíricas relativas a gran diversidad

de asuntos, origina la existencia de un gran número de indicadores de accesibilidad (Grasland, 1999)⁶¹, como veremos a continuación.

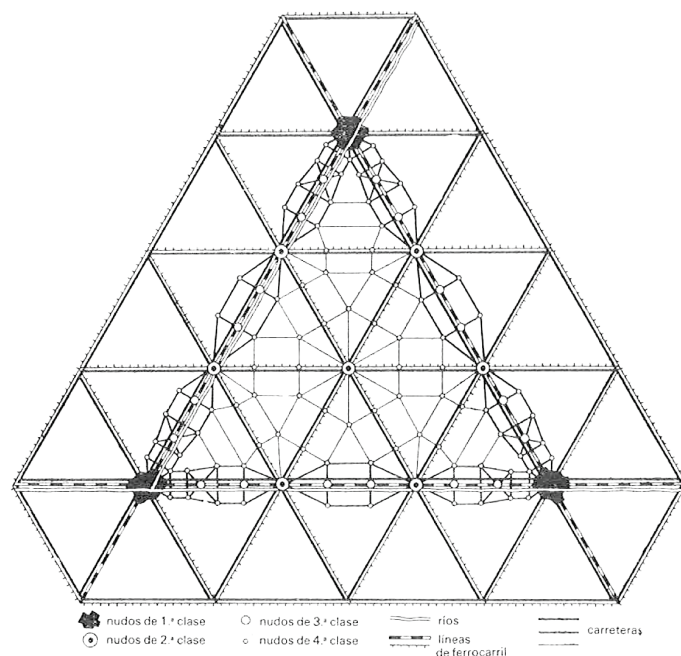


Figura 25. Modelo anisotrópico de las redes de comunicación. Fuente: R. Domanski, 1963⁶².

La complejidad de la red dificultaba inicialmente su descripción y el análisis de sus características, por lo que se introducen ciertas simplificaciones. William L. Garrison y D.F. Marble publican en 1962 un estudio⁶³ sobre la estructura espacial de la red de transporte aplicando métodos gráficos basados en las propiedades

⁶¹ GRASLAND, C. (1999) Seven proposals for the construction of geographical position indexes (potential, accessibility, concentration): Application to the measure of demographic accessibility and population potential of European Union and neighbouring countries. ESDP – France, Working paper. Citado por (Joly, 1999)

⁶² Citado en Potrykowski, M., & Taylor, Z. (1984). *Geografía del transporte*.

⁶³ Garrison, W.L., Marble, D.F. (1962) *The Structure of Transportation Networks*. (Evanston, IL: Transportation Center Northwestern University)

topológicas de los grafos, a partir de los desarrollos planteados por Leonhard Euler⁶⁴ en el siglo XVIII como una rama de la Topología Algebraica (Cardozo, Gómez, & Parras, 2009). De ese estudio surgen posteriormente multitud de trabajos que ponen de relieve la validez de su aplicación en el análisis de la accesibilidad geográfica (Burton, 1962; Marble, 1965; Reed, 1970; Hagget, 1970; Tinkler, 1977; Estébanez, 1978; García Lorca, 1979; Brunet Estarells, 1982; Seguí Pons y Petrus Bey, 1986-1991; Escalonada, 1990; Bosque Sendra, 1992; etc.)⁶⁵. El requisito fundamental del cálculo topológico de los grafos es la representación de la red mediante una configuración abstracta de un conjunto de puntos (nodos, nodos o vértices) unidos por un conjunto de líneas (segmentos, aristas o arcos) (ver Figura 26).

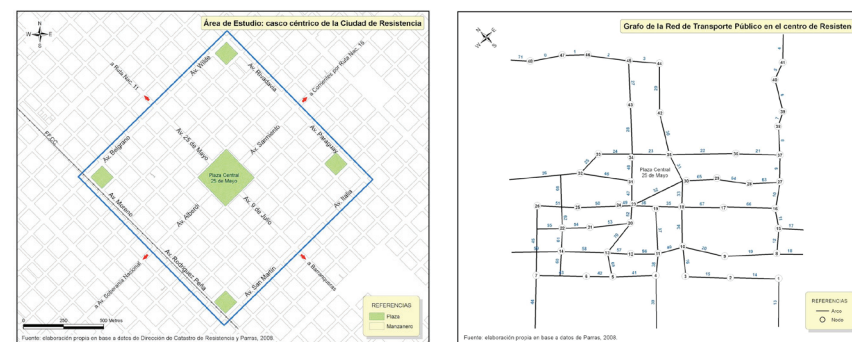


Figura 26. Mapa territorial del casco céntrico de la ciudad de Resistencia (Argentina) y esquema del grafo de la red de transporte público en esa área que analiza las conexiones entre paradas. Fuente (Cardozo, Gómez, & Parras, 2009).

La aplicación de la teoría de los grafos en el análisis de la red de comunicaciones tiene especial importancia en la medida que caracterizan la cohesión y la accesibilidad que confiere la estructura viaria (Hagget, 1976)⁶⁶, además de

⁶⁴ Euler, L. (1741) The solution to a problem relating to the geometry of position. *Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae*, 8, pp. 128-140

⁶⁵ Citados en (Garrido Palacios, 1995) o (Cardozo, Gómez, & Parras, 2009)

⁶⁶ HAGGETT, Peter. *Análisis Locacional en la Geografía Humana*. Colección Ciencia Urbanística 17. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1976. Citado por (Cardozo, Gómez, & Parras, 2009).



dotar de jerarquía espacial a los nodos y arcos. El grado de cohesión en las comunicaciones de la red constituye una medida que permite valorar la complejidad de las conexiones de la región, estableciendo relaciones entre el nivel de desarrollo del sistema de transporte y el sistema socioeconómico existente. El significado de cohesión tendrá más valor cuando se comparen distintas redes o se estudie la evolución de una determinada a lo largo del tiempo.

Para medir la cohesión se suelen emplear **indicadores de densidad** calculados mediante la relación entre un valor que se refiera a la red viaria y un parámetro que hace referencia a una característica del territorio. Entre ellos destacan los indicadores topológicos que se obtienen a partir del número de vértices y aristas del grafo, y las longitudes del grafo y subgrafos existentes (Potrykowski & Taylor, 1984), como por ejemplo: el grado de cohesión de la red de Z. Prihar (1956); el número ciclomático o índice de Betti; los índices de cohesión de K.J. Kansky (1963); el grado de desarrollo del grafo G_p propuesto por A. Zagozdzon (1970); etc.

La sencillez que aportan estos índices es una ventaja muy importante para su utilización, pero también va a ser la causa de sus defectos. Uno de los más importantes es que no reflejan la distinta configuración de varias redes con idénticos índices, ni distingue los cambios que se producen en una misma red al aumentar vértices y aristas. Esto dio lugar a la búsqueda de nuevos métodos que diferenciases claramente estructuras de red distintas, y que además introduzca un índice sintético que reaccione simultáneamente a todas las propiedades del grafo. En 1970 G. A. James presenta un método con esas características, basado en el trabajo estadístico realizado por J. K. Ord tres años antes, y que permite recoger todos los nodos y aristas en la denominada **matriz de conectividad** (Ecuación 5).

Ecuación 5

$$A_{ij} = [a_{ij}]$$

Los índices i, j representan los nodos, mientras que a_{ij} refleja la existencia de comunicación directa entre dos nodos si su valor es 1, o la falta de comunica-

ción cuando es 0. Si sustituimos los unos por el número de aristas contadas a lo largo de la vía más corta entre cada par de nudos tenemos la matriz de distancias topológicas, también conocida como **matriz de accesibilidad**.

A partir de la matriz de accesibilidad se obtienen diferentes medidas topológicas, como por ejemplo los que propone A. Shimbel, donde la **accesibilidad topológica** (Ecuación 6) se considera la suma de las distancias entre un nodo y el resto de nodos de la red.

Ecuación 6

$$A_y = \sum d_{xy}$$

El nudo más accesible será el de menor valor de A_y . A partir del valor de A_y se obtienen el índice de longitud media de W.E. Reed (1970) y el índice omega de accesibilidad relativa de F. P. Stutz (1973). Shimbel también propone el índice de dispersión **del grafo** o índice G (Ecuación 7) con el que se obtiene la accesibilidad total de la red.

Ecuación 7

$$D(G) = \sum \sum d_{xy}$$

Relacionando este valor con el número total de nodos del grafo, se puede comparar el nivel de **accesibilidad entre distintas redes gracias al Índice de Accesibilidad Media (IAM)** (Ecuación 8) o jerarquizar cada nodo dentro de la red considerando menos accesibles aquellos que tiene un A_y superior al valor promedio IAM obtenido.

Ecuación 8

$$IAM = \frac{D(G)}{n}$$

Otro índice muy empleado es el índice de Koning o **de centralidad de un nudo**, también llamado **número asociado**. Mediante él se determina para cada nudo

el número de arcos que es preciso recorrer hasta llegar al nudo más alejado, empleando el camino más corto. Menor índice implica mayor centralidad.

Siguiendo con el análisis topológico de la red de transporte, que se mostraba en los indicadores anteriores (que podríamos recopilar bajo la denominación de indicadores topológicos (Monzón de Cáceres, 1988)), donde sólo se considera la red y su continuidad en el espacio, encontramos en el **factor de ruta o índice de trazado** (Ecuación 9), uno de los indicadores más interesantes. Relaciona la distancia del menor camino existente entre dos puntos con unas características determinadas (d_{ij}), con la distancia geográfica de la línea recta que los une, es decir la distancia euclídea, conocida también como distancia a vuelo de pájaro (dg_{ij}). El valor asociado entre dos puntos será:

Ecuación 9

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{dg_{ij}}$$

El valor integral de un punto se obtiene respecto a todos los demás de la red, y se expresa como (Ecuación 10) donde n hace referencia al número total de nodos menos uno.

Ecuación 10

$$Itr_i = \frac{1}{n} \sum \left[\frac{d_{ij}}{dg_{ij}} \right]$$

Este indicador fue usado en el Plan General de Carreteras 1984-1991, viniéndose empleando desde entonces en diferentes trabajos de investigación y estudios de planes territoriales o de carreteras (Varela García, Análisis de las comunicaciones comarcales a través de la red viaria de los municipios de la provincia de La Coruña, 2000). Cuanto más se aproxime este indicador a la unidad, mejor será la calidad de comunicación entre dos núcleos.

Este índice puede aplicarse con otros factores en lugar de la distancia, como podrían ser el tiempo o el coste de un recorrido. Si se emplea el tiempo del

desplazamiento, tenemos el índice de trazado-velocidad (Ecuación 11), donde el tiempo real es el numerador y el tiempo óptimo o ideal es el denominador.

Ecuación 11

$$Itrv_i = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{t_{ij}}{t_{oij}} \right)$$

Con este índice de trazado podemos representar la accesibilidad a través de las curvas de isoaccesibilidad, que unen los puntos con el mismo valor del indicador de accesibilidad, y representan expresivamente la accesibilidad sobre un territorio. Según estas curvas se refieran a la distancia, al tiempo o incluso al coste, se habla de curvas de isodistancia, isocronas o isocostes, respectivamente.

Sobre estos índices de accesibilidad basados en el factor de ruta pueden realizarse modificaciones, ponderando los **indicadores en función del peso poblacional** (Ecuación 12) de los núcleos utilizados como nodos (Calvo Palacios, Jover, Pueyo, & Alonso, 1993), aportando el enfoque inductivo al proceso deductivo anterior.

Ecuación 12

$$Cc_i = \frac{\sum (d_{ij} \cdot P_j)}{\sum (dg_{ij} \cdot P_j)}$$

Gutiérrez & Monzón (1998), también adaptan este indicador para proponer un indicador de accesibilidad que atienden a la eficiencia de la red (Ecuación 13).

Ecuación 13

$$E_i = \sum_j \frac{\left(\frac{d_{ij}}{dg_{ij}} \cdot P_j \right)}{\sum (P_j)}$$

Esta idea defiende que la accesibilidad espacial o geográfica puede ser entendida como una función de decaimiento (Skov-Petersen, 2001) donde se considera el total de distancias recorridas o costes empleados (tiempo, energía, dinero, etc.) por la demanda potencial que hace uso de un bien o servicio, y que

se puede traducir como un producto entre la distancia que separa dos puntos (uno de oferta y otro de demanda) por la cantidad de población o usuarios que requieren ese bien o servicio (Ramírez, 2003).

Este tipo de análisis nos acerca a una clasificación destacada de indicadores agregados basados en la formulación de la teoría de la atracción universal de Newton. Estos índices están relacionados con los **modelos gravitatorios** (*gravity-based measures*) sobre la analogía que parece existir entre la interacción de los grupos humanos y la atracción de masas (Geertman y Ritsema van Eck, 1995)⁶⁷. Generalizando el concepto de “potencial de población” definido por Stewart (1948)⁶⁸, estos índices analizan un nodo con respecto al resto en función del grado de relaciones, factores y actividades que se producen entre ellos según cada estudio en concreto, considerando la relación inversa entre la atracción y la distancia que separa oferta y demanda. El indicador de accesibilidad de gravedad tiene la siguiente expresión:

Ecuación 14

$$A_i = \sum_{j=1}^n \frac{O_i * S_j}{T_{ij}^k}$$

Donde,

A_i : es la accesibilidad relativa del punto i (o el potencial de una actividad concreta en ese lugar)

O_i : es el factor que determina la capacidad de la zona i para generar viajes al nodo j.

S_j : indica el tamaño de la actividad en la zona j.

T_{ij} : indica el coste de desplazamiento (distancia, tiempo, etc.) ponde-

rado en función del peso potencia o atracción del viaje de i a j, que vendrá definido por el factor K.

k: efecto de la fricción de la distancia que habitualmente está entre 1 y 2. Cuanto mayor sea este valor más acusada será la acción disuasoria de la distancia.

Este indicador, con sus diversas variantes (Knox, 1980; Joseph y Phillips, 1984; Kirby, 1979; Ayeni, 1979; Thomas, 1987; Bröker, 1989; Moreno, 1992; Shen, 1998; etc.)⁶⁹, está indicado para medir la accesibilidad a servicios en los cuales es importante tener en cuenta el tamaño de la oferta que se realiza en cada punto, además de la distancia a la demanda (Bosque Sendra, 1997). En función de que se analice únicamente la atracción de los centro de demanda o de los centro de oferta, los parámetros O pueden no ser considerados en el indicador, por lo que su valor sería 1.

Por ejemplo, (Shen, 1998)⁷⁰ propone una medida de accesibilidad que puede interpretarse como la suma de oferta potencial relativa de cada destino ponderado por la demanda potencial de ese destino, siguiendo la Ecuación 14.

Ecuación 15

$$A_i = \sum_{j=1}^n \frac{M_j f(c_{ij})}{D_j} ; D_j = \sum_m N_m f(c_{mj})$$

Donde,

A_i : es la accesibilidad relativa del punto i (o el potencial de una actividad concreta en ese lugar)

M_j : es el factor que determina la capacidad de la zona j para generar viajes o la atracción del punto j.

⁶⁷ Geertman, S.C.M., Van Eck, J.R.R. (1995) *GIS and models of accessibility potential: an application in planning*. International Journal of Geographical Information Systems. Volume 9, Issue 1, 1995, Pages 67-80. Citado en (Salado García, 2004)

⁶⁸ J. Q. Stewart. *Demophic Gravitation: Evidence and Applications*, Sociometry 11: 1-2 (2/5/48), 31-58. Citado por (Hansen, 1959)

⁶⁹ Citados por (Salado García, 2004)

⁷⁰ Shen Q 1998 Location characteristics of inner-city neighbourhoods and employment accessibility of low-wage workers. Environment and Planning B 25: 345-65. Citado por (Liu & Zhu, 2004b)

$f(c_{ij})$: es la función de impedancia que atiende al coste de desplazamiento entre los nodos i y j .

N_m : indica el peso del punto m (por ejemplo, la población)

También pueden considerarse funciones exponenciales para caracterizar la accesibilidad (Ecuación 15), donde la estimación del parámetro λ es crucial, y cuanto más cercano a cero es, mayor es el radio de desplazamiento. Se tendrán parámetros diferentes según las regiones, la actividad a desarrollar, la unidad de costes de desplazamiento, etc. La estimación empírica de estos parámetros λ puede verse en diferentes autores (Hansen (1959), Fortheringham (1981)), y normalmente es necesario utilizar datos de encuestas de movilidad sobre los que se realizan diferentes operaciones de ajuste estadístico (Skov-Petersen, 2001).

Ecuación 16

$$P_i = \sum_{j=1}^n O_j \cdot \exp(-\lambda \cdot d_{ij})$$

En algún análisis podría resultar especialmente útil la aplicación del método de Converse (1949)⁷¹, derivado de la ley de gravitación del comercio desarrollada por Reilly (1931), que permite hallar la “línea de ruptura” entre dos áreas de influencia a partir de los puntos donde se igualan las fuerzas de atracción de los nodos oferta o demanda. Con ello se obtendría para cada nodo un área cercana asociada a él donde todos sus puntos tendrían una atracción mayor hacia ese nodo que hacia cualquier otro de la región analizada.

Aplicando el **modelo de áreas de captación continuas y probabilísticas** de Huff (1964)⁷² (Ecuación 16) donde para cada área se compara su accesibilidad con el total de la región (con r centros), se consigue un análisis de geomar-

⁷¹ Converse, D. 1949. “New Laws of Retail Gravitation”, Journal of Marketing, 14: 379-384. Citado por (Schnetter M., 2004)

⁷² HUFF, D. L. (1964), “Defining and Estimating a Trading Area,” Journal of Marketing, Vol. 28 (Julio), 34-38. Citado por (De Juan Vigaray & Rivera Camino, 1999)

keting, en el que se obtiene la probabilidad de que un habitante de cada área (A_i) acceda al centro estudiado (S).

Ecuación 17

$$P_i = \sum_{j=1}^n O_j \cdot \exp(-\lambda \cdot d_{ij})$$

Siguiendo con aplicaciones probabilísticas, aparece un grupo de medidas de accesibilidad recopiladas bajo el llamado “**modelo de utilidad aleatoria**” (*random utility theory based measures*), muy utilizado en investigaciones sobre localización de centros de servicios (Ghosh y McLafferty, 1987)⁷³. Este conjunto de indicadores evalúan la utilidad relativa que el usuario obtendría acudiendo a una instalación determinada frente al resto de posibles elecciones.

En general este tipo de indicadores de accesibilidad, precisa un alto grado de detalle en la información de partida (definición espacial de orígenes y destinos, grupos sociales, motivo del viaje, tipo de equipamiento, medida de atracción del centro, fricción de la distancia, etc.), por lo que es necesario un calibrado y ajuste adecuado de estas funciones. Los resultados de estos indicadores no representan normalmente una magnitud física, por lo que su interpretación sólo será valiosa analizada como cifras relativas de comparación entre diferentes zonas de estudio (Geertman y Ritsema van Eck, 1995; Handy y Niemeir, 1997)⁷⁴, o por la evolución en el tiempo de la accesibilidad de una misma región.

Una crítica muy frecuente a estos indicadores agregados es que no contemplan la posibilidad de viajes multipropósito en los desplazamientos, con más de un destino. Por ello algunos autores abogan por **indicadores desagregados**, y por tanto más complejos y costosos en su cálculo y la interpretación de los resultados. Incluso se contempla la combinación de medidas cuan-

⁷³ Ghosh y McLafferty (1987) *Location Strategies for Retail and Service Firms*. Lexington Books. Citados por (Salado García, 2004)

⁷⁴ Citados por (Salado García, 2004)



titativas con evaluaciones cualitativas para enriquecer la comprensión del comportamiento de transporte de familias y la accesibilidad en un barrio o en una comunidad. Entre ellos, el más conocido es el **Método Life-Path** desarrollado por Hagérstrand y Thrift en los años 60 y 70, donde el tiempo se considera como un componente de igual importancia que el espacio (Monzón de Cáceres, 1988). En él se establece la manera en la que se realizan los viajes desde un origen hacia los distintos destinos, tanto en el espacio como en el tiempo, lo que añade el término de velocidad (Thrift, 1977). Aunque son poco frecuentes, encontramos modelos sobre SIG que determinan el camino diario potencial en función del tipo de persona y sus hábitos cotidianos, analizando los lugares fijos del viaje de la persona, así como zonas de oportunidad en las que podría parar según su recorrido obligado, determinando áreas de camino potencial entre actividades consecutivas (Dijst & Kwan, 2003).

Otro tipo de indicadores de accesibilidad atienden a la disponibilidad de ciertos equipamientos o servicios (número o medida de cualquier característica propia) dentro de un alcance espacial dado (*cumulative-opportunity measures*), medido según distancias euclidianas, o a través de la red de transporte, o percibidas, o mediante costes económicos o del tiempo empleado en el desplazamiento. Estas medidas, resultado de los trabajos de Wachs y Kumagai (1973)⁷⁵ y de Oberg (1976)⁷⁶, y los cálculos asociados a este tipo de indicadores, son fácilmente ejecutables sobre Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Podemos observar como los componentes que intervienen en el concepto de accesibilidad, están relacionados con la calidad de los servicios de transporte, la cantidad y la distribución de la oferta y demanda de oportunidades, las restricciones temporales que puedan existir, e incluso las preferencias, capacidades y necesidades a nivel individual de la persona o colectivo que se desplaza (Geurs & van Wee, 2004). Como vimos en el apartado 2, los

SIG facilitan la integración, manejo, representación y análisis de diversos datos geográficos, mostrándose especialmente útiles para el cálculo de los indicadores de accesibilidad pues en todos ellos la componente espacial es fundamental. De hecho podemos afirmar que **los SIG han reinventado el análisis espacial** (Openshaw, 1996), pues han permitido no sólo reactivar la aplicación de modelos y métodos existentes antes del empleo de estos sistemas, sino que sus funcionalidades de visualización, simulación y geoprocesamiento de datos geográficos han generado nuevos modelos de análisis geoespacial (de Smith, 2004) como los que se muestran en el apartado siguiente. En esta investigación nos centraremos en el componente de la accesibilidad que atiende a las distancias y a las condiciones de los desplazamientos que ofrece la configuración de una determinada red de infraestructuras de transporte..

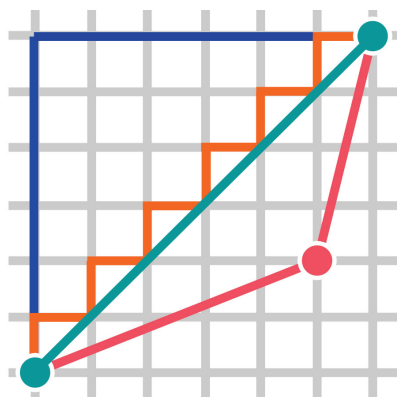
3.4. Modelos de accesibilidad territorial sobre SIG

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden diferenciar la variedad de zonas y elementos geográficos presentes en un área de estudio, y calcular con relativa comodidad la distancia (euclidiana o no) entre diferentes puntos geográficos, relacionándola con los conceptos de red, ruta y espacio usado (de Smith, 2004), y aportando restricciones, impedancias u obstáculos en los recorridos. La mayoría de los SIG ofrecen tres procedimientos fundamentales para calcular la distancia: basándose en las coordenadas planas o geográficas (ajustadas lo más aproximadamente posible a la forma de la Tierra) entre dos lugares; determinando la suma de longitudes parciales entre los enlaces de una red que los una; y sumando las longitudes de los segmentos de líneas rectas que representan una forma, recorrido o elemento (Figura 27).

⁷⁵ WACHS, M. and KUMAGAI, T. (1973) Physical accessibility as a social indicator. *Socioeconomic Planning Science*, 7, 327-456. Citado por (El-Geneidy & Levinson, 2006)

⁷⁶ Citado por (Makrí & Folkesson, 1999)

Figura 27. Comparación entre la distancia Euclidiana (línea verde que mide la raíz de 72, es decir, 8.485); la distancia por sumas parciales (línea roja que mide la suma de la raíz de 29 y la raíz de 17, es decir, 9.508) y las diferentes opciones mediante la distancia Manhattan (líneas azules y naranja que todas tienen la misma longitud de 12 unidades). Basado en la imagen de Wikipedia.⁷⁷



Gracias a estas funciones de medición de la distancia, los SIG pueden aplicar multitud de operaciones de cálculo sobre un modelo que represente la forma y características de la superficie terrestre. Ya sea en formato vectorial o en formato ráster, las propiedades de los SIG lo convierten en un interesante instrumento para el cálculo de índices territoriales sobre datos geográficos reales en formulaciones y modelos conocidos, más allá de las consideraciones teóricas habitualmente usadas con los grafos (Cardozo, Gómez, & Parras, 2009). Esta circunstancia hace que posiblemente una de las aplicaciones más útiles de los SIG sea el cálculo de los caminos o rutas de menor coste en los desplazamientos sobre el territorio (Collischonn & Pilar, 2000), y por tanto también, el cálculo de modelos de accesibilidad.

En las últimas décadas los SIG han sido utilizados como herramientas fundamentales para evaluar y valorar la accesibilidad de la población a determinados bienes, especialmente mediante el uso del análisis espacial de redes sobre datos vectoriales. La red se entiende como un conjunto interconectado de entidades lineales por la cual se desplazan recursos, sean vehículos, personas, bienes o información, y que forman una estructura espacial representada sobre la base de segmentos y nudos que corresponden a cruces de segmentos,

en sintonía con la teoría matemática de los grafos (Comas y Ruiz, 1993), como ya vimos en apartados anteriores. Pero la evolución de la tecnología informática ha permitido trabajar con redes complejas, y surgen nuevos indicadores que utilizan directamente las medidas geométricas de los recorridos, superando las limitaciones de cálculo en donde los grafos simplifican la red real. La medición de distancias en desplazamientos mediante el análisis de redes sigue la geometría lineal (arcos) que une los nodos de conexión, pudiendo establecerse algún tipo de impedancia o criterio de movimiento sobre los arcos y los nodos (sentido de circulación, giro o paso impedido, tiempos de espera en los nodos, velocidades asignadas a los arcos, etc.) que afectará al cálculo final del coste entre dos lugares, y lo acercará más a la realidad de estos recorridos.

Desde que (Dijkstra, 1959) planteó un método para encontrar la ruta más corta desde un nodo a otro u otros diferentes, su algoritmo es uno de los más empleados para este tipo de análisis sobre SIG (Yu, Lee, & Munro-Stasiuk, 2003). Sin embargo, Smith y Gahinet (1988)⁷⁸ plantean ciertas dificultades para emplear este método debido a la complejidad que supone obtener a partir de datos geográficos vectoriales, una red topológica continua sobre la que definir las condiciones de movilidad en todos sus elementos. Además, el modelo vectorial no considera todo el territorio, sino que lo aísla en los nodos interconectados con las líneas que intentan representar la red considerada. Se obtienen por tanto valores de accesibilidad, mediante las diferentes formulaciones comentadas, únicamente en los nodos especificados. En estas circunstancias, conseguir mediciones de accesibilidad en cualquier lugar del territorio requiere extrapolar los valores calculados en los nodos a través de un proceso de interpolación geoespacial, lo cual es un análisis complejo que precisa multitud de parámetros estadísticos para adecuarse a la realidad territorial específica de cada zona de estudio. No existe un método de interpolación espacial universalmente establecido como más adecuado en toda situación (Olaya, 2011), por lo que debe elegirse analizando diversos factores de entre muchos tipos (Kri-

⁷⁷ Imagen encontrada en la definición del término "Distancia". Creador de la figura: "Psychonaut". (<http://es.wikipedia.org/wiki/Distancia> - Última visita: 19 de mayo de 2012)

⁷⁸ Smith T R, Gahinet P M (1988) Least cost paths through space, Ch.11 in Coffey W (ed.) (1988) Geographical systems and systems of geography: Essays in honour of William Warntz, Univ. of W. Ontario, Geography Dept., London, Ontario. Citados por (de Smith, 2004)



ging, vecino natural, interpolación picnofiláctica, por vecindad, ponderados por distancia, por ajuste de funciones, por curvas adaptativas, etc.). Además, cada método presenta un cierto número de variables y parámetros de ajuste, muchos de ellos relativos a formulaciones estadísticas, que ofrecerán resultados muy distintos en función de valor se les asigna. Aunque muchos trabajos de accesibilidad usando cálculos vectoriales, posteriormente presentan resultados más allá de los nodos considerados, la incorrecta aplicación de los procesos de interpolación puede generar resultados que no se ajusten a la realidad en determinadas zonas del análisis.

Por otro lado, (Bunge, 1962) planteó que el concepto de “red de longitud mínima” puede ser interpretado de formas muy distintas dependiendo de las limitaciones que se consideren y de los criterios seguidos para alcanzar un recorrido determinado (Figura 28). Por ello en algunos análisis sobre redes vectoriales, el algoritmo de Dijkstra debe variarse o debe considerarse usar otro método de cálculo del camino mínimo (algoritmo de Bellman-Ford, algoritmo de A^* ⁷⁹, etc.).

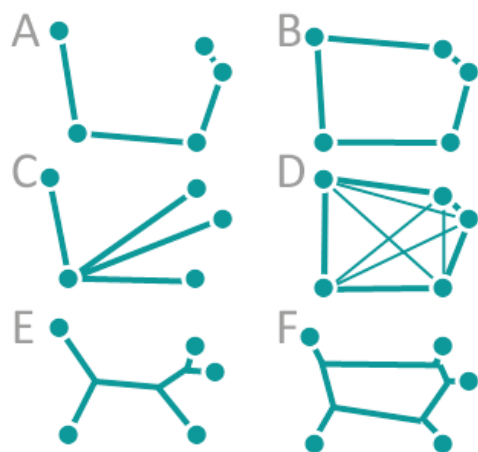


Figura 28. Esquemas de red de longitud mínima según distintos criterios de elección planteada por (Bunge, 1962)⁸⁰

⁷⁹ Planteado por Mitchell, J.S.B. and Kiersey, D.M., 1984, Planning strategic paths through variable terrain data. Applications of Artificial Intelligence, SPIE, 485, 172-179. Citado por (Husdal, 2000)

⁸⁰ Incluido en Haggett, P., Cliff, A. D. and Frey, A. (1977) Locational methods (London)

Sin embargo, debido a la eficacia del algoritmo de Dijkstra y a la sencillez de su programación, su uso se extendió notablemente, e incluso se ha trasladado también al modelo de datos ráster, donde los problemas comentados del formato vectorial pueden simplificarse o incluso desaparecer. Para la correcta ejecución del algoritmo sobre este modelo, debe cumplirse que los centros de cada celda del ráster actúen como nodos de la red, y que las conexiones entre los centros de una celda y los centros de las celdas vecinas actúen como arcos de esa red (Xu y Lathrop, 1994, 1995)⁸¹. El proceso seguido para la elección del camino de coste mínimo en este caso muestra similitudes con la ley de refracción óptica de Snell, enunciada en el siglo XVII, como puso de manifiesto August Lösch⁸² a mediados del siglo XX, en estudios del transporte donde relaciona un recorrido por tierra y por mar. Beckman⁸³ y Werner⁸⁴ ampliarán las aplicaciones de esta ley a finales de la década de 1960, examinando los modos de trazar una vía en un área compuesta por zonas con diferentes costes de transporte. Sin embargo, especialmente para la obtención de rutas óptimas en largos recorridos, muestran mejores soluciones los métodos que realizan una exploración exhaustiva de la región de análisis, considerada como un espacio geográfico continuo no uniforme.

⁸¹ Xu, J., and Lathrop, R. G., 1994, Improving cost-path in a raster data format. Computers & Geosciences, 20, 1455-1465. Xu, J., and Lathrop, R. G., 1995, Improving simulation accuracy of spread phenomena in a raster-based geographic information system. International Journal of Geographical Information Science, 9, 153-168. Citados por (Yu et al., 2003)

⁸² Lösch A (1954) The economics of location, Yale Univ. Press, New Haven Beckman. Citado por (de Smith, 2004)

⁸³ Beckman M (1967) Principles of optimum location for transportation networks, Northwestern Univ. Studies in Geography, 13, 95-117. Citado por (de Smith, 2004)

⁸⁴ Werner, C., 1968, “The Law of Refraction in Transportation Geography: its Multivariate Extension”, The Canadian Geographer, XII, 1:28-40. Citado por (de Smith, 2004)

Este concepto fue ampliamente estudiado por Warntz⁸⁵, Tobler⁸⁶ e Isard⁸⁷, entre otros autores, entendiendo que las analogías con el movimiento de los rayos de luz, la refracción y la progresión del frente de onda son herramientas clave en el análisis de los problemas de la ruta. Warntz analiza el concepto de ruta óptima o de menor coste considerando los efectos geodésicos de los recorridos de larga distancia, a través de trayectorias ortogonales a las líneas de isocoste sobre una superficie, en sendos trabajos publicados en la década de los sesenta. Sobre estos trabajos, (Warntz, 1965) propone una superficie de coste acumulado (SCA; o ACS-Accumulated Cost Surface- en inglés) por la que el coste del desplazamiento se calcula en todas direcciones desde un punto inicial considerado.

El formato ráster consigue un modelo continuo del territorio y posee capacidades analíticas de gran potencia gracias al Álgebra de Mapas (Tomlin, 1990), por lo que se mostró muy adecuado para aplicar este modelo de análisis basado en SCA. El método SCA implica operaciones desde la preparación de los datos al cálculo del resultado final, en la que se utilizan los cuatro tipos de funciones establecidas por Tomlin. Por ello, entre sus principales desventajas destaca que puede requerir un gran número de operaciones en función de la extensión territorial a estudiar, y de la precisión de las celdas escogida, con lo que el tiempo de cálculo suele ser muy elevado, y lo hace incompatible para la resolución de problemas en tiempo real. Ni tampoco suele ser adecuado para analizar la conectividad entre múltiples puntos (de Smith, 2004), pues requiere repetir los procesos para cada uno de ellos. Además la definición de los costes a emplear

⁸⁵ Warntz W (1965) A note on surfaces and paths with applications to geographic problems, Disc. paper, Michigan Inter-Univ. Comm. Math. Geog., Ann Arbor, Michigan and Warntz (above). Citado por (de Smith, 2004)

⁸⁶ Tobler W R (1961) Map transformation of geographic space, Unpub. PhD thesis, Univ. of Washington, Seattle Tobler W R (1963) Geographic area and map projections, Geog. Review, 53, 59-78. Citado por (de Smith, 2004)

⁸⁷ Isard W (1971) On relativity theory and time-space models, Papers, Proc. Reg. Sci. Assoc., 26, 7-24

Isard W (1971) Spatial interaction analysis: some suggestive thoughts from general relativity, Papers, Proc. Reg. Sci. Assoc., 27, 17-43. Citado por (de Smith, 2004)

en la superficie de fricción, varía en función de múltiples factores del territorio y del medio de transporte analizado, con lo que añadido a la falta de definición geométrica del formato ráster⁸⁸, puede perderse información de la superficie real sobre la que se quiere hacer el estudio (Stefanakis & Kavouras, 1995).

Sin embargo, la versatilidad de este modelo ráster, más sencillo de implementar sobre SIG que el modelo vectorial (Bemmelen, Quak, Hekken, & Oosterrom, 1993), soluciona las problemáticas comentadas cuando se necesita obtener una red topológica con los datos vectoriales, y la falta de operatividad de esta red para calcular la accesibilidad en cualquier punto del territorio. Por este motivo, las técnicas de SIG ráster son utilizadas con mayor frecuencia en grandes áreas, particularmente en zonas rurales, pues no restringen los desplazamientos sólo a la red de carreteras e incorporan la movilidad a través del terreno (Ebener, Morjani, Ray, & Black, 2005). Al emplearse usualmente para estudios, análisis y trabajos de planificación, los tiempos de cálculo amplios no son un inconveniente de importancia. Y puesto que normalmente estos modelos ráster se emplean en zonas geográficas de gran tamaño, la falta de definición geométrica que implica tampoco genera distorsiones de relevancia.

En las investigaciones sobre estos planteamientos, aparecen otros métodos de exploración de un espacio continuo, como los basados en las analogías del movimiento de insectos, por ejemplo las hormigas. Se plantean algoritmos informáticos de exploración, en los que se requiere una fase de aprendizaje para posteriormente realizar análisis más complejos, con restricciones, barreras, datos asimétricos y problemas multipunto. Este tipo de estudios se emplean en el campo de la kinodinámica para la investigación de la movilidad y la navegación de robots. Otro modelo de exploración, basado en la utilización de árboles al azar para la optimización de una región triangular con obstáculos, a partir del

⁸⁸ (Bemmelen et al., 1993) clasifican las distorsiones geométricas de las rutas generadas por una malla ráster estándar en tres tipos: error de elongación, error por desviación y distorsión de proximidad. Con respecto a la asignación de los valores más adecuados a cada celda del ráster proponen emplear el método Delphi o la Técnica del Grupo Nominal para minimizar las divergencias en la caracterización de los elementos reales que se pretenden parametrizar.



problema de Steiner⁸⁹, le ha servido a (de Smith, 2004) para desarrollar el método VORTAL (Variational Optimisation of Random Trees ALgorithm). A partir de nuevos tipos de algoritmos, como Distance Transforms (DTs) (Hudecek & Zakova, 2011), Rapidly-expanding Random Trees (RRTs) (Theobald, y otros, 2007), Artificial Neural Networks (ANN) (Shellito & Pijanowski, 2003; Lee, Ryu, Min, & Won, 2003; Samad & all, 2011) (Olaru & Raicu, 2001), etc. se siguen desarrollando nuevas herramientas SIG de análisis de accesibilidad que posiblemente cambien la manera de enfrentarse a estos problemas en el futuro.

Pero en la actualidad, el modelo basado en una superficie de coste acumulado (SCA), también conocido como algoritmo de Coste Distancia (Longley et al 2005) o de Costes de Recorrido (Bosque Sendra & Moreno Jiménez, 2004) o de Acumulación de Costes (Lage Reis-Correia, 2010), es la técnica más común para el análisis de los movimientos a través de una superficie continua. Es más ventajoso y adecuado implementar superficies de fricción sobre el modelo de representación ráster (Olaya, 2011) que sobre el modelo vectorial, y se consigue calcular fácilmente el coste de desplazamiento entre dos puntos gracias a la suma acumulada del coste que contiene cada celda del camino (Ebener et al., 2005).

Para los objetivos planteados en este trabajo de investigación, el modelo ráster se adapta perfectamente al interés de incorporar de forma rápida y sencilla cualquier tipo de parámetro técnico o funcional de los trazados de las infraestructuras viarias, como los que describiremos en el capítulo 4. Además con el algoritmo Coste Distancia se consigue, no solo incluir las características viarias de forma eficiente en los cálculos de accesibilidad, sino atender a otros facto-

res territoriales que incidirán en la accesibilidad territorial de una región. Con la finalidad de conocer en más profundidad el funcionamiento, las ventajas y las limitaciones de este modelo, haremos una descripción más detallada del algoritmo Coste Distancia en el siguiente apartado.

3.4.1. Algoritmo de Coste Distancia

Muchos análisis de accesibilidad y estudios de planificación territorial, precisan evaluar las distancias entre cualquier punto del territorio, entendido como un espacio continuo. En estos casos, es necesario generalmente recurrir al formato ráster sobre un SIG, para representar los datos y poder emplear una función espacial que determina el coste acumulado en el desplazamiento desde uno o varios puntos tomados como origen, al resto de puntos de una región. Este método de cálculo está basado en los trabajos que Warntz desarrolló en la década de 1960, donde proponía una superficie de coste acumulado (SCA; o ACS-Accumulated Cost Surface- en inglés), obtenida al definir el espacio mediante un número de regiones con diferentes costes de viaje asignados a ellos, según el tipo de terreno por el que se realice el desplazamiento y según el medio de transporte empleado. Se plantea una estrategia geométrica en dos etapas, para crear una SCA a partir de los costes acumulados obtenidos entre los orígenes considerados y todos los destinos posibles, y luego se calcula el trazado de rutas óptimas o de menor longitud desde cualquier punto del territorio analizado y el origen más cercano, desde el punto de vista del tipo de coste analizado (tiempo, distancia, consumo energético, consumo monetario, seguridad, impacto, etc.) (Collischonn & Pilar, 2000; Miller & Bridwell, 2009; Stefanakis & Kavouras, 1995). Su operatividad ha permitido que este tipo de función basada en una SCA, sea común para identificar cuencas de drenaje (Douglas, 1994), y como veremos con detalle en este apartado, para cálculos de accesibilidad y obtención de rutas óptimas.

Aunque este planteamiento puede aplicarse a diferentes representaciones geométricas del espacio geográfico en dos y en tres dimensiones (Stefanakis & Kavouras, 1995), el cálculo de la ruta óptima se ha resuelto principalmente

⁸⁹ Gilbert E N, Pollock H O (1968) Steiner minimal trees, J. Soc. Ind. Applied Maths., 14, 255-265. Citado por (de Smith, 2004)

Melzak Z A (1964) On the problem of Steiner, Canad. Math. Bull., 4, 143-148. Citado por (de Smith, 2004)

Hanan M (1966) On Steiner's problem with rectilinear distance, J. Soc. Indust. Applied Maths., 14, 1- 29. Citado por (de Smith, 2004)

Hwang F K (1976) On Steiner minimal trees with rectilinear distance, SIAM J. of Applied Math., 30, 1, 104-114. Citado por (de Smith, 2004)

sobre una superficie plana que integra zonas caracterizadas por costes variables de movimiento (Warntz, Lindgren⁹⁰, Douglas⁹¹). Se parte de un mapa dasimétrico formado por celdas homogéneas distribuidas de forma uniforme (normalmente celdas cuadradas sobre una malla rectangular como ya comentamos en el apartado 2.4), que recogen el coste que supone atravesar esos lugares geográficos en función de múltiples parámetros conocidos, medidos o estimados. El territorio sobre el que se miden los desplazamientos se caracteriza en función de la resistencia que cada lugar ofrece al movimiento en función de sus características geográficas o territoriales, medidas en diferentes unidades (longitud, tiempo, energía, dinero, etc.) según el tipo de análisis que se quiera realizar.

Sobre esa superficie de fricción, denominada **superficie de costes**, se calcula el coste acumulado en el movimiento entre cualquier celda del mapa y la celda o celdas de referencia, denominadas **celdas fuente**. Estas celdas fuente pueden ser consideradas como origen o lugar de destino del viaje, y a partir de ellas se calcula en todas direcciones mediante una función de dispersión (Tomlin, 1990), el gasto de desplazamiento hacia las celdas vecinas. El coste del desplazamiento entre dos celdas, también denominado coste de paso (Collischonn & Pilar, 2000), depende por lo tanto de la resistencia que ofrecen

ambas a ser atravesadas, según el factor considerado en ellas para evaluar su coste de movilidad, y la distancia euclidiana existente entre los centros de ambas. A medida que el proceso de cálculo se ejecuta, las celdas van adquiriendo el menor valor del coste empleado para llegar a ella desde alguna de las celdas fuente. De entre todas las celdas con coste acumulado calculado, la de menor valor actuará como celda origen para establecer nuevos cálculos, continuando un proceso iterativo hasta que todas las celdas obtienen el menor coste acumulado de desplazamiento a una celda fuente.

La regularidad de la malla generada por las celdas cuadradas implica que una celda comparte cada uno de sus cuatro laterales con celdas iguales a ella, que a su vez comparten sus otros tres laterales con otras celdas similares de la malla. De esta forma la relación entre una celda y sus celdas vecinas, se puede establecer en los SIG mediante diferentes patrones de vecindad que relacionan el centro de la celda con el centro de las celdas cercanas. También hay experiencias para operar con otros puntos del interior (Douglas, 1994) mediante interpolaciones (Figura 29), o también a través de diferentes puntos identificados sobre el borde de la celda (Bemmelen et al., 1993) (Figura 30), aunque su complejidad operativa los ha descartado para la mayor parte de las aplicaciones y funciones desarrolladas en SIG.

⁹⁰ Lindgren C E S (1967) Determination of geodesic and minimum path lines by graphical methods, Harvard Papers in Theor. Geog., 6, Cambridge, Mass. Citado por (de Smith, 2004)

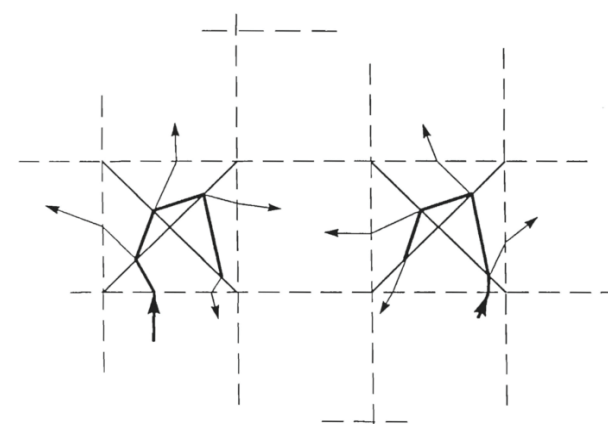
E.S. Lindgren: 'Proposed Solution for the Minimum Path Problem', Harvard Papers in Theoretical Geography, Geography and the Properties of Surfaces Series, Cambridge, No.4, 23 pp, 1967. Citado por (de Smith, 2004; Stefanakis & Kavouras, 1995)

E.S. Lindgren: 'A Minimum Path Problem Reconsidered', Harvard Papers in Theoretical Geography, Geography and the Properties of Surfaces Series, Cambridge, No.28, 11 pp, 1969. Citado por (de Smith, 2004; Stefanakis & Kavouras, 1995)

E.S. Lindgren: 'A Study of the Movement of a Point on a Plane and in Space', Harvard Papers in Theoretical Geography, Geography and the Properties of Surfaces Series, Cambridge, No.36, 16 pp, 1969. Citado por (de Smith, 2004; Stefanakis & Kavouras, 1995)

⁹¹ Douglas D H (1994) Least cost path in GIS using an accumulated cost surface and slope lines, Cartographica, 31, 3, 37-51. Douglas D.H.: 'The Parsimonious Path Based on the Implicit Geometry in Gridded Data and on a Proper Slope Line Generated from It', Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Handling, Edinburgh, Scotland, 1133-1140, 1994. Citado por (Stefanakis & Kavouras, 1995)

Figura 29. Posibles caminos de comunicación dentro de una celda de un ráster (Douglas, 1994)



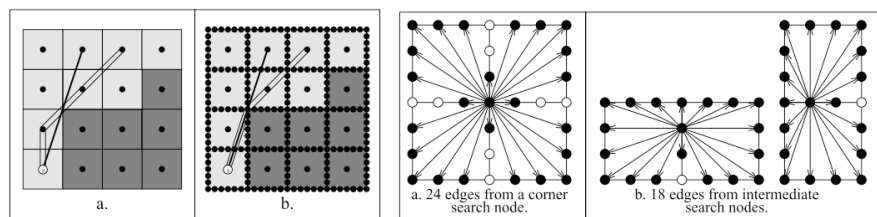


Figura 30. Esquema de localización de puntos diferenciados al centro de una celda para establecer rutas de comunicación en una malla ráster (Bemmelen et al., 1993)

La relación del centro de una celda con sus vecinas ha dado lugar a tres grandes tipos de conexiones, que por similitud con los movimientos de algunas piezas del juego de ajedrez, se han denominado patrón de movimiento de Torre para la conexión con 4 celdas vecinas, patrón de Reina cuando conecta con las 8 celdas limítrofes (**aunque posiblemente sea más acertado llamarle patrón de Rey**)⁹², y patrón de Caballo al enlazar además con 8 nuevas celdas igual que la figura que realiza la pieza del caballo en sus movimientos sobre el tablero de ajedrez, y conectando en este caso la celda central con 16 celdas. La Figura 31 muestra estos tres tipos de patrones de movimientos.

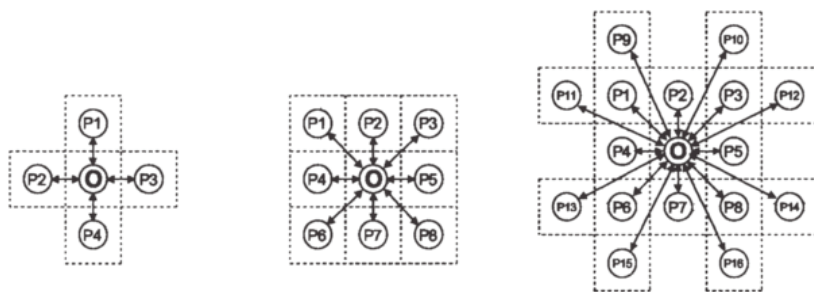


Figura 31. Tres tipos de patrones de vecindad para el formato de datos ráster (Yu et al., 2003).

⁹² Personalmente, creo que realmente debería denominarse patrón de movimientos de Rey, pues sólo se desplaza una unidad geométrica en la malla, igual que la pieza de ajedrez que representa al Rey, y que solo se puede mover una casilla en cualquier dirección desde la casilla en la que se encuentra. Por su parte la Reina puede desplazarse más de una casilla si lo desea, y ese comportamiento no es admisible en los patrones de movilidad del modelo ráster.

Como se puede apreciar en la imagen, la conexión de cada celda con sus vecinas genera dos enlaces, uno para cada sentido de la marcha, de forma que está permitido entrar y salir de una celda a otra vecina. En el caso isotrópico, los costes de ambos enlaces son iguales, mientras que en el caso anisotrópico esta circunstancia no tiene porqué ser así (Collischonn y Pilar 2000), variando el coste de un sentido con respecto al coste del movimiento en sentido contrario. En el siguiente apartado 3.4.2, analizaremos con más detalle estas diferencias.

A medida que se aumentan las posibilidades de conexión de la celda central con las vecinas, se disminuye la distorsión que puede producirse en la dirección real del movimiento sobre el territorio y el ángulo que se emplea en el movimiento modelado sobre el formato ráster. Por ello podrían obtenerse incluso patrones de movimiento de 32, 64 y 128 conexiones (Bemmelen et al., 1993), aunque son muy poco utilizados. (Xu and Lathrop, 1995)⁹³ analizan la eficacia de añadir celdas adicionales más allá de las ocho vecinas. Lo que es seguro es que con mayores posibilidades de conexión, los problemas de cálculo computacional se complican. Además podría llegar a cometerse errores, por saltarse celdas vecinas a la celda origen, cuando estás deberían ejercer un efecto de barrera, que al obviarse en ese caso, no se considera.

Por lo tanto, lo más habitual es considerar un patrón de movilidad basado en 8 celdas (Figura 32), en donde los costes de desplazamiento se obtendrían mediante la ecuación:

Ecuación 18

$$CA_D = CA_O + d_g \cdot (C_o + C_D)$$

considerando que,

CA_D : es el Coste Acumulado para la celda destino D tras el desplazamiento desde la celda origen O. En el caso de que la celda destino D

⁹³ Xu, J., and Lathrop, R. G., 1995, Improving simulation accuracy of spread phenomena in a raster-based geographic information system. International Journal of Geographical Information Science, 9, 153-168. Citado por (Husdal, 2000)

ya tuviese un valor de coste acumulado, este variaría siempre que el nuevo CA_D fuese menor al existente.

CA_O : es el Coste Acumulado para alcanzar la celda origen O desde alguna de las celdas fuente consideradas en el análisis.

d_g : es la distancia geométrica entre la celda O y la celda D, que podrá ser directamente el tamaño o la resolución de la celda (en el caso de movimientos horizontales o verticales) o esa dimensión multiplicada por la raíz de 2 (para movimientos diagonales)

C_O : es el Coste asociado a la celda O dentro de la Superficie de Costes

C_D : es el Coste asociado a la celda D dentro de la Superficie de Costes

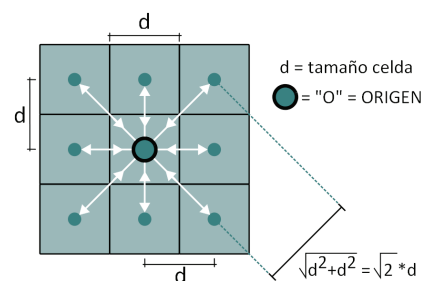


Figura 32. Desplazamientos admisibles desde una celda origen a las celdas destino que la rodean, considerando un patrón de movimiento de 8 celdas.

Para que este algoritmo Coste Distancia pueda ejecutarse, normalmente requiere disponer de dos archivos con los datos de entrada (Figura 33). Uno que fije los lugares sobre los que queremos tener información de costes de desplazamiento por el territorio, hacia o desde ellos. Como ya hemos indicado, a las celdas que identifican esos lugares las denominaremos **celdas fuente**. Y el archivo que identifica estos sitios lo llamaremos archivo fuente. Además es imprescindible tener un archivo ráster que recoja el coste que supone atravesar cada una de las celdas que compone la rejilla o matriz que representa el territorio analizado. Este fichero será conocido como **superficie de costes**. La ejecución del algoritmo Coste Distancia obtiene un nuevo archivo ráster en el que a cada celda con valor no nulo en la superficie de costes, se le asigna como

valor, el menor coste acumulado que se necesita para llegar desde ella a la celda fuente más próxima de las especificadas en el archivo fuente, en función de las dificultades y resistencias a los movimientos definidas. Para que el modelo tenga sentido las celdas fuente deben estar contenidas geográficamente en el espacio definido por la superficie de costes.

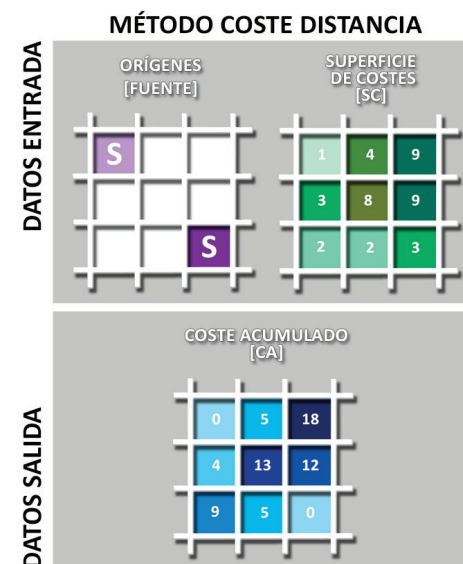


Figura 33. Esquema de datos de entrada y de salida para el algoritmo de Coste Distancia.

El proceso seguido por este algoritmo parte de considerar el centro de cada celda como un nodo enlazado a los ocho contiguos mediante líneas rectas. Cada enlace entre dos nodos conlleva una impedancia que se basa en el coste por unidad de desplazamiento asociado a ambas celdas y en la distancia que las separa, según la Ecuación 17.

El cálculo comienza en cada una de las celdas fuente determinadas, y se parte en ese caso con un coste acumulado de valor cero, calculando los costes acumulados de todas las celdas vecinas a las celdas fuente. Cada celda sobre la que se haya calculado un coste acumulado se considerará celda activa. La



celda activa que tenga el menor coste acumulado de todos los calculados, actuará como celda origen en el siguiente cálculo, en donde se operará con las celdas vecinas, que no hayan sido celda origen (salvo en el caso de modelo anisotrópico, donde el sentido del desplazamiento puede generar variación en los costes acumulados). El proceso se repite de manera iterativa, y en cada uno de los pasos de cálculo, se comparan los valores ya calculados en las celdas activas, por si hubiese rutas de desplazamiento de menor valor a las obtenidas previamente. Este cálculo continúa desde las celdas del borde de la zona con los menores costes acumulados (Figura 34), operando con cada una de las celdas vecinas hasta que todas las celdas que presenten dato en la superficie de costes⁹⁴, alcanzan su menor coste acumulado posible.

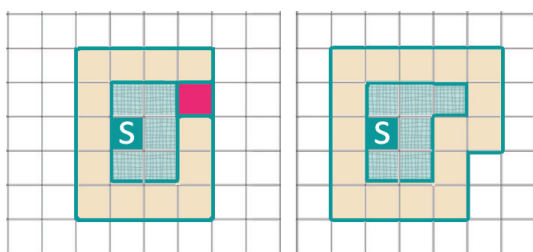


Figura 34. Representación del proceso de cálculo de la superficie de coste acumulado.⁹⁵

Aprovechando la relativamente buena descripción que se hace de este algoritmo en la documentación de ayuda del programa ArcGIS⁹⁶, mostraremos los

⁹⁴ Las celdas que no presenten ningún valor en la superficie de costes no entrarán en el proceso de cálculo del algoritmo coste distancia.

⁹⁵ La celda S es la celda fuente, origen de los cálculos. Las celdas rayadas son celdas cerradas pues ya poseen el menor coste acumulado de desplazamiento hasta S. Las celdas del borde son aquellas que ya tiene un valor calculado de CA, pero aún no es el definitivo, siendo la celda roja de la imagen izquierda, la celda activa del borde pues tiene el menor CA de todas ellas. Sobre esta celda activa se calcula el CA de todas las celdas vecinas no cerradas, incluyendo incluso las pertenecientes al borde. El resultado es la figura de la derecha, donde la celda activa pasa a considerarse cerrada para los siguientes cálculos.

⁹⁶ Descripción de cómo es el funcionamiento de la herramienta Coste Distancia (cost distance) dentro del programa ArcGIS de la empresa ESRI. http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/How_the_cost_distance_tools_work/009z00000025000000/

ficheros de entrada de datos y de salida de datos, del ejemplo⁹⁷ que se plantea en esa documentación, tras ejecutar el algoritmo Coste Distancia (Figura 35). El tamaño de celda en este caso se considera la unidad para simplificar al máximo los cálculos.

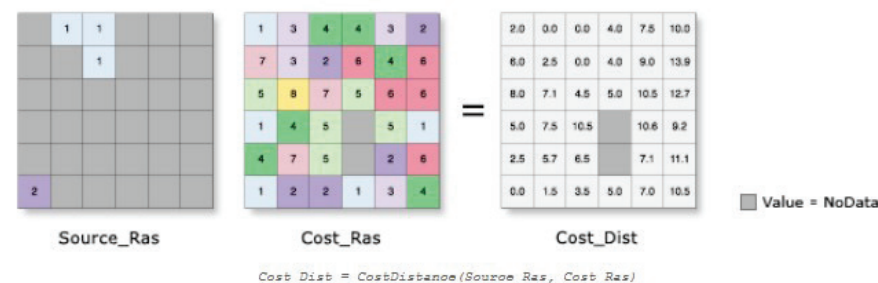


Figura 35. Ejemplo de los dos ficheros ráster de entrada de datos (celdas fuente y superficie de costes), y del fichero ráster resultado de la aplicación del algoritmo coste distancia, donde se muestran los costes acumulados. Fuente: <http://resources.arcgis.com>

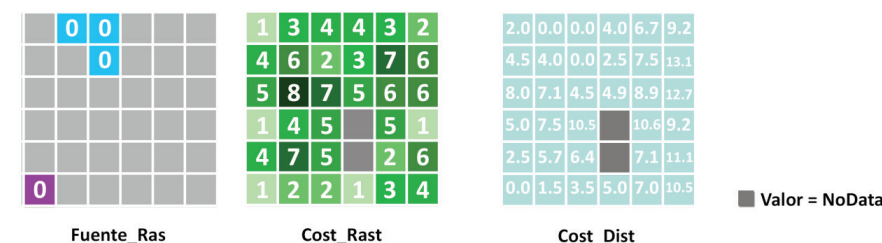


Figura 36. Ejemplo de los dos ficheros ráster de entrada de datos (celdas fuente y superficie de costes), y del fichero ráster resultado de la aplicación del algoritmo coste distancia, donde se muestran los costes acumulados. Cálculos propios.

Durante este proceso de cálculo se obtiene para cada celda, además del valor del coste acumulado en los desplazamientos, la dirección seguida al atrave-

⁹⁷ Aunque se toman como datos de entrada los mismos que se propone en esta documentación de ArcGIS, el fichero de salida generado tras el proceso de cálculo del algoritmo coste distancia, no coincide en nuestros cálculos con lo que se muestra en esa documentación. Hemos detectado errores en las tres primeras celdas de la última columna, y que en nuestros cálculos alcanzan un valor final de (9,2; 13,1; 12,7); mientras que en la documentación consultada de ArcGIS unas veces lo reflejan como (9,2; 13,5; 14,5); y en otras como (10; 13,9; 12,7).

sarla para llegar al destino señalado previamente. Por este motivo, una vez obtenidos los valores de coste acumulado en toda la región de análisis, es relativamente sencillo obtener la ruta óptima entre cualquier celda del mapa y la celda fuente más cercana considerada en el análisis, simplemente siguiendo las celdas de menor coste acumulado. (McIlhagga, 1997)⁹⁸ plantea una diferencia en este algoritmo de búsqueda de ruta óptima, pues propone seguir no estas celdas, sino los caminos que generen menor coste de desplazamiento entre cada par de celdas, a partir de las celdas de menor coste acumulado, lo que ofrece rutas finales ligeramente diferentes.

	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
1	1	1	1	2	2		1	1.4	1.0	1.4	2.9	4.9	1	1.4	1.0	1.4	2.9	4.9
2	1	1	1	2	2		2	1.0	0.0	1.0	2.5	4.5	2	1.0	0.0	1.0	2.5	4.5
3	1	1	2	2	2		3	1.4	1.0	2.1	3.1	5.1	3	1.4	1.0	2.1	3.1	5.1
4	1	1	2	2	2		4	2.4	2.0	3.1	4.9	5.9	4	2.4	2.0	3.1	4.9	5.9
5	1	2	2	2	2		5	3.4	3.5	4.1	5.9	7.7	5	3.4	3.5	4.1	5.9	7.7

Figura 37. Diferencias para el cálculo de rutas de óptimas, siguiendo el método normal atravesando las celdas de menor valor acumulado (imagen central con el camino en rojo), o empleando el procedimiento propuesto por McIlhagga de seguir el camino que presente el menor coste de desplazamiento en ese recorrido (imagen de la derecha con el camino en verde), por lo que se atiende a la superficie de costes (imagen de la izquierda). Fuente: (Husdal, 2000)

En este proceso de cálculo del método basado en una SCA, gracias a la aplicación de un método similar al propuesto por Converse (1949) se puede ha-

⁹⁸ McIlhagga, D., 1997, Optimal path delineation to multiple targets incorporating fixed cost distance. Unpublished, Honours Thesis for Bachelor of Arts, Carleton University. Citado por (Husdal, 2000).

Ciertamente se aprecia una incoherencia en la Figura 37, pues para obtener valor de 5,1 en la celda de salida considerada en el camino, debe seguirse la ruta roja, y no la verde. Sin embargo, puede que la ruta de menor coste no se la óptima como propone McIlhagga. Aunque su propuesta no tiene repercusión en las comunicaciones científicas, dejamos aquí esta alternativa, simplemente para mostrar la diversidad de variantes que pueden ejecutarse o plantearse sobre el modelo original. En el texto comentaremos también otros planteamientos de rutas óptimas como el de (Collischonn & Pilar, 2000) o (Yu et al., 2003) más adecuados para los trazados de infraestructuras viarias.

llar también la “línea de ruptura” entre dos áreas de influencia a partir de los puntos donde se igualan las fuerzas de atracción, como ya comentados en el apartado 3.3. En este caso, a partir de las celdas donde se igualan los costes acumulados se zonifica el ámbito de análisis, asignando cada una de las celdas a la fuente más próxima, entendiendo proximidad como el menor coste necesario para llegar a ella (zonificación por proximidad).

2.0	0.0	0.0	4.0	6.7	9.2
4.5	4.0	0.0	2.5	7.5	13.1
8.0	7.1	4.5	4.9	8.9	12.7
5.0	7.5	10.5	sin dato	10.6	9.2
2.5	5.7	6.4	sin dato	7.1	11.1
0.0	1.5	3.5	5.0	7.0	10.5

Figura 38. Zonificación en el ejemplo comentado en la Figura 36

Este algoritmo Coste Distancia presenta unas grandes ventajas para los análisis de accesibilidad, pues permite obtener los costes de desplazamiento entre los lugares elegidos y cualquier otro lugar del ámbito de estudio, poder trazar las rutas óptimas o de menor coste entre ellos, y asignar zonas de proximidad o áreas de cobertura para cada uno de los lugares escogidos inicialmente, en el caso de seleccionar más de uno. Además es de fácil implementación y ágil operativa de cálculo, por lo que este algoritmo tiene una presencia importante en los estudios de accesibilidad. Su funcionamiento está ampliamente extendido sobre diferentes aplicaciones SIG comerciales y en programas de investigación (algunas de las cuales comentaremos en el apartado siguiente), por lo que pueden encontrarse múltiples referencias de su uso aplicadas a gran variedad de temáticas diferentes⁹⁹, como por ejemplo al paisaje (Romo Peña & Torres Cantero, 2011) (Gietl, Doneus, & Fera, 2007) (Adriaensen et al., 2003) (Graham, 2001) (Stephen Rogers, 2004); al medio ambiente y ecología

⁹⁹ En general, el algoritmo de coste distancia en principio podría emplearse en cualquier problema que se pueda expresar como la minimización de una integral de línea (Romo Peña & Torres Cantero, 2011):



(Scharenbroich, 2006) (Drielsma, Ferrier, & Manion, 2007) (Céspedes Agüero, 2006) (Halleux & Greene, 2001) (Bradshaw, Lalas, & Thompson, 2000) (Amoedo, Pérez, Oste, Marull, & Comunicación, n.d.) (Rodríguez Freire, 2005); a la arqueología (Lage Reis-Correia, 2010) (Cooper, 2010) (Vallès, Bolas, & Pérez, 2010); a los servicios sanitarios (Black, Ebener, Aguilar, Vidaurre, & Morjani, 2004) (Ray & Ebener, 2008); a la planificación territorial y de infraestructuras del transporte (Farrow & Nelson, 2001) (Ploeckl, 2008) (Bosque Sendra & García, 2000) (Pedro, 1999) (Pablo, Muñoz, & Myro, 2003) (Zhang, Li, Li, Shen, & Chen, 2010); etc.

También encontramos consideraciones teóricas sobre el modelo que estudian sus limitaciones y plantean posibles mejoras al mismo (Meyerson, Munagala, & Plotkin, n.d.) (Bemmelen et al., 1993) (Buller, 2000) (de Smith, 2004) (Collischonn & Pilar, 2000) (Ebener et al., 2005) (Eastman, 1985) (Husdal, 2000) (Miller & Bridwell, 2009). Un estudio de especial interés es el propuesto por (Yu et al., 2003) para atender a la planificación de posibles puentes o túneles que permitan determinar rutas óptimas de menor longitud gracias al cálculo basado en las superficies de costes acumulados. Plantean un nuevo algoritmo denominado “*Smart Terrain*” que se basa en el concepto de contorno, para identificar las celdas que se encuentran sobre una misma curva de nivel, y calcular el posible trazado de una línea recta horizontal para comunicar dos puntos de ese contorno. El trazado resultante sería recto y horizontal, cumpliendo con las características que normalmente tienen puentes y túneles. El procedimiento de cálculo a partir de ahí es similar al de coste distancia, pero utiliza además un modelo digital del terreno (MDE) para considerar la distancia espacial (*spatial distance*) entre los centros de las cotas, para atender así a la diferencia de cota entre ellas (Figura 39). Este planteamiento de usar un MDE también lo emplearon (Collischonn & Pilar, 2000) en su propuesta de un algoritmo de cálculo de rutas de menor coste donde se favorecen los recorridos con menor diferencia de pendiente, similar a como se diseñan y construyen los trazados de caminos y canales.

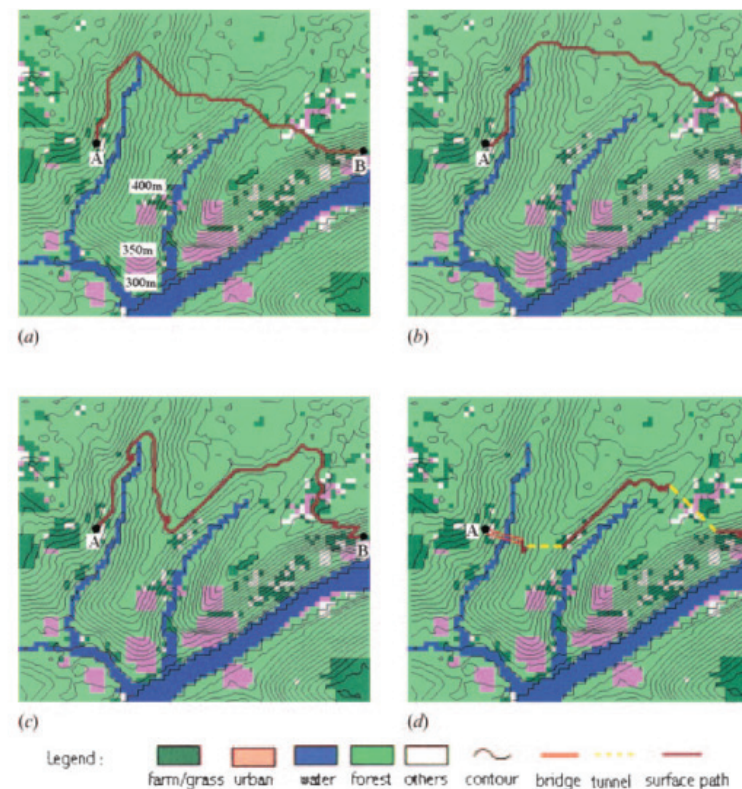


Figura 39. Ejemplo de diferentes rutas óptimas calculadas por a) modelo de coste distancia isotrópico; b) modelo considerando la distancia espacial (diferencia de cotas entre las celdas); c) modelo con variación de costes; d) modelo *Smart Terrain* para detectar potenciales puentes y túneles. (Yu et al., 2003)

La versatilidad del algoritmo Coste Distancia ha permitido hasta conseguir que el modelo ráster puedan funcionar con prácticamente las mismas capacidades que demuestra el modelo vectorial mediante el análisis de redes. De hecho, un software denominado MFworks, desarrollado por la empresa Thinkspace, hoy aparentemente desaparecido¹⁰⁰, implementa operadores del álgebra de mapas

¹⁰⁰ Aunque el desarrollo inicial de este programa es de Thinkspace, y se constatan datos de este software desde 1998, parece que la empresa Keigan Systems Inc. adquirió los derechos de MFworks, y sacó una versión 3.0 en 2003, pero tampoco hemos sido capaces de localizar datos sobre esta empresa en la actualidad, ni sobre este programa.

planteados por (Tomlin, 1990), aportando un amplio conjunto de funciones de conectividad entre las celdas del ráster, posiblemente tomando como base el *Map Analysis Package* desarrollado por el propio Tomlin (Husdal, 2000). La clave del funcionamiento de este modelo es asignar una vinculación específica para aquellas celdas que sean de un mismo tipo, es decir que representen a una misma entidad, y tengan por tanto un mismo valor. De esa forma, a las celdas que representan una red de carreteras podría asignarse de forma automática, las conexiones existentes con sus celdas vecinas que también representen a una carretera (Figura 40). Posteriormente se asignan de una forma manual, restricciones de movimientos y sentidos de flujo sobre las celdas que lo requieran.

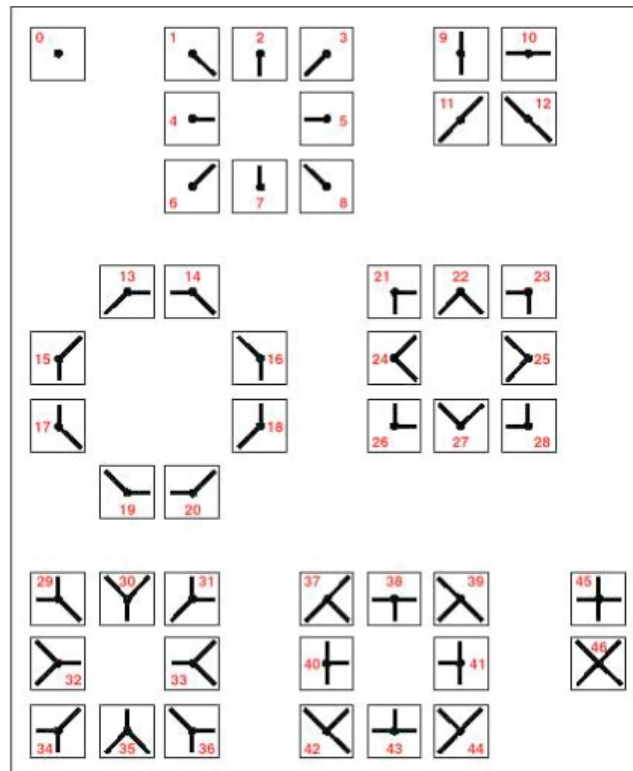


Figura 40. Esquema de los valores asignados a las celdas en función de la estructura de conexión que permite con las celdas vecinas, implementado por la empresa Thinkspace (2000) para el software MFworks. (Husdal, 2000)

Jan Husdal plantea como posibilidad adicional futura, identificar las conexiones con la siguiente fila de celdas más allá de las ocho vecinas, para poder considerar la existencia de viaductos o pasos a distinto nivel (Figura 41). Tomlin, dando un paso más allá en esta línea, le sugiere un método para identificar celdas conectadas mediante una tabla, independientemente de su cercanía. Aunque este algoritmo requeriría un cierto ingenio para su codificación, los beneficios que aportaría serían considerables (Husdal, 2000).

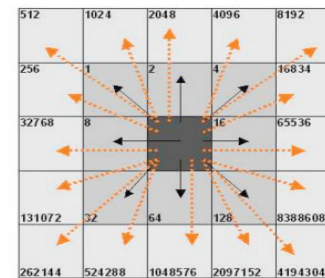


Figure 7-1:
Extending Tomlin's directional identifiers.

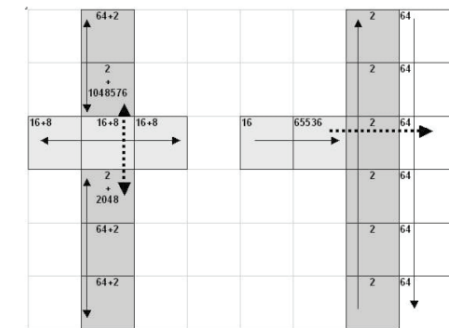


Figura 41. Propuesta de identificadores de conexión desde celda central a 24 celdas vecinas y ejemplo de aplicación para pasos a distinto nivel (Husdal, 2000)

El modelo basado en las SCA ha ido, desde su planteamiento inicial, mejorándose y generando diferentes adaptaciones para permitir resolver algunos de los problemas que sobre él se fueron detectando, como hemos visto en los ejemplos anteriores, o para trabajar con superficies de fricción anisotrópicos como veremos en el próximo apartado 3.4.2, frente al espacio isotrópico usualmente empleado. Esta posibilidad de mejora en el algoritmo, nos anima a considerar el efecto barrera que ejercen determinadas infraestructuras lineales sobre los desplazamientos territoriales, y que como enunció (de Smith, 2004), requiere enfoques de optimización más sofisticados. Como veremos en el capítulo 5.3, cuando describamos el algoritmo de coste distancia condicionado que se propone en esta investigación, intentamos solucionar esta problemática, añadiendo condiciones específicas en los desplazamientos permitidos entre las celdas, y que en cierta medida, intentar resolver el reto planteado por Tomlin a Husdal.

3.4.2. Modelo general anisotrópico y particular isotrópico

Muchos de los modelos teóricos que se han desarrollado sobre la localización geográfica (Von Thünen en localización agrícola en 1826; Weber para localización industrial en 1909; Christaller en su formulación de lugar central en 1933; el modelo gravitatorio de interacción espacial; el modelo de Hagërstrand¹⁰¹ sobre propagación geográfica de la innovación en 1967; etc.) consideran el territorio como isotrópico (Tobler, 1993), donde el coste del transporte es una constante con relación a la distancia. Aunque sus formulaciones conceptuales son fundamentales para entender nuestro mundo, su aplicación real sobre el territorio presenta limitaciones. De hecho el análisis espacial en sí mismo debe estar basado en la falta de uniformidad del espacio, como defiende David Harvey (1969)¹⁰².

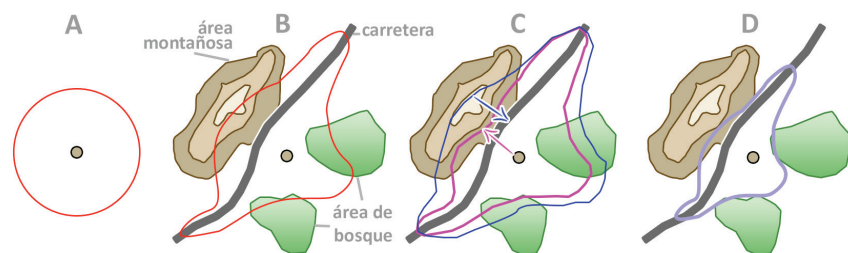


Figura 42. Esquema de las diferencias en el establecimiento de áreas de influencia respecto a un punto considerando distintas situaciones. La figura (A) muestra un terreno isotrópico puro. Las figuras (B) y (D) muestran diferentes elementos que aportan costes de desplazamiento distintos, por las zonas y por los movimientos (en coche, andando, en bici, etc.). La figura (C) muestra influencia de costes anisotrópicos. Basado en (Ray & Ebener, 2008)

El coste de los desplazamientos sobre un territorio se puede definir como la conjunción entre lo que se necesita invertir para obtener el movimiento, y la resistencia que presenta el medio para dificultarlo o favorecerlo. El valor del coste de desplazamiento que se emplea en los algoritmos de acumulación de costes, se basa en las características de los espacios geográficos de des-

plazamiento y en la dirección del movimiento. En función de la naturaleza de la variable que interviene en la definición del coste de cada espacio de desplazamiento, la fricción puede ser distinta para cada dirección de tránsito en ese lugar. Por ejemplo, no es lo mismo caminar a favor del viento que en su contra, donde el movimiento será más difícil y costoso. Si nos fijamos en la ladera de un terreno, comprobamos que presenta su máxima resistencia al desplazamiento siguiendo la línea de máxima pendiente del mismo. Sin embargo, si en el mismo lugar de la ladera se sigue la dirección de la curva de nivel, la resistencia al movimiento será menor. Es decir, la resistencia es diferente para cada dirección, por lo que el coste del desplazamiento será de tipo anisotrópico. Considerar el cálculo de accesibilidad isotrópico o anisotrópico presentará por lo tanto diferentes resultados como demuestran (Ebener et al., 2005) gracias a la implementación de la biblioteca MAPA¹⁰³ (*Modelling Anisotropic Physical Accessibility*) para permitir una combinación más sencilla de diferentes componentes que influyen en la accesibilidad física humana como el uso de la tierra, el modelo de elevación digital (MDE o *digital elevation model* DEM en inglés) o capas vectoriales lineales de carreteras y ríos. Con el simple hecho de considerar la cota de cada celda, se permite variar las distancias entre una celda y las 8 vecinas, y la pendiente precisa para cada dirección de desplazamiento, como proponen (Collischonn & Pilar, 2000) y (Yu et al., 2003) en sus respectivos algoritmos para cálculo de rutas de menor coste. (Ray & Ebener, 2008) además de implementar la influencia del MDE para calcular la cobertura y accesibilidad a servicios sanitarios sobre su desarrollo AccessMod¹⁰⁴, tienen en cuenta la distribución espacial de la población.

Un problema añadido al trabajar con superficies de fricción anisotrópicas es cómo combinar varias fuerzas resistentes que actúen de forma simultánea sobre un lugar. En el caso del modelo isotrópico, bastaría con sumar los valores de las capas de fricción, o en todo caso, normalizar o ponderar aquellas que no

¹⁰¹ Hagërstrand, T (1967) *Innovation diffusion as a spatial process*, Chicago Univ. Press, Chicago

¹⁰² Harvey, David (1969) *Explanation in Geography*. Citado por (de Smith, 2004)

¹⁰³ Biblioteca en C++ de enlace dinámico (DLL), basado en la biblioteca BOOST código abierto (<http://www.boost.org>)

¹⁰⁴ La Organización Mundial de la Salud ha adoptado esta aplicación para alguno de sus programas. <http://www.who.int/kms/initiatives/accessmod/en/>

tuviesen una influencia equivalente. Sin embargo, en el modelo anisotrópico debemos atender a la dirección de coste máximo para cada variable, además del valor en cada punto. Así, en ocasiones las variables se sumarán, pero en otros casos, unas restarán fuerza a las otras, como por ejemplo si el viento sopla pendiente arriba en una ladera. En estos casos debe considerarse el binomio coste-dirección (c, α) como un vector y convertirlo en sus componentes sobre los ejes cartesianos ($x=c \cdot \cos \alpha$, $y=c \cdot \sin \alpha$), que ya podrán sumarse en una capa diferente para cada eje. El coste máximo y la dirección de máxima fricción en cada lugar se obtendrán con esas dos capas a partir de las siguientes expresiones:

Ecuación 19

$$c = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\alpha = \tan y/x$$

Una vez que se dispone del coste máximo y de la dirección en la que se produce este coste máximo, se obtiene la superficie de coste acumulado anisotrópica en base a la desviación angular del desplazamiento a calcular respecto a la dirección de máximo coste. Así se permite calcular los costes unitarios de fricción efectiva en cualquier dirección (Olaya, 2011) mediante fórmulas del tipo:

Ecuación 20

$$c = d \cdot [c_1 \cdot \cos^k(\alpha_1) + c_2 \cdot \cos^k(\alpha_2)]$$

donde d es la distancia que separa los centros de la celdas de valor c_1 y c_2 , α_1 y α_2 son las diferencias entre el ángulo del movimiento y los ángulos de máximo coste de las celdas, y k es una constante. En función del fenómeno, se puede adaptar esta expresión a formulaciones más específicas que modelicen adecuadamente el tipo de movimiento.

Aunque los problemas reales no suelen ser isotrópicos (Romo Peña & Torres Cantero, 2011), y en la naturaleza habitualmente nos encontramos con fenómenos donde la resistencia del medio cambia según la dirección, muchas veces se pueden simplificar como procesos isotrópicos, que son más fáciles de

modelizar y comprender (Olaya, 2011). Por esa razón los modelos isotrópicos son los más implementados sobre SIG, y consecuentemente, los más empleados en la mayor parte de los análisis de accesibilidad.

3.4.2.1. Aplicaciones SIG para el modelo Coste Distancia Isotrópico

En el caso de las funciones implementadas en SIG para el cálculo del algoritmo de Coste Distancia en modelos de movilidad isotrópicos, la mayor parte de los software consultados presentan funciones muy similares que cumplen prácticamente igual con el algoritmo Coste Distancia descrito en el apartado anterior. Suelen diferenciarse en las opciones para introducir los datos necesarios para ejecutar el algoritmo, y ligeras cuestiones del procesamiento de la información calculada. Sin embargo las pruebas realizadas con ellos, para los mismos datos, ofrecen resultados idénticos o muy similares, a diferencia de lo que sucede con los algoritmos que atienden a condiciones de desplazamientos anisotrópicos, y que veremos más adelante. A continuación se describen brevemente algunas de las funciones presentes en los algunos SIG representativos, de los que ya hablamos en el apartado 2.6: IDRISI, GRASS, ARCGIS y SEXTANTE.

IDRISI incorpora el módulo COST que ofrece dos posibles algoritmos para la determinación de los costes distancia: COSTPUSH y COSTGROW, basados en los trabajos de (Eastman, 1985). La diferencia más importante entre ellos es que el segundo permite operar con superficies de fricción complejas, en donde se incluyen barreras absolutas para el movimiento, caracterizadas con valores negativos. Esto permite caracterizar un trazado viario con valores de fricción en proporción inversa a la velocidad máxima y valor (-1) en el exterior de las rutas para impedir el paso (Bosque Sendra & García, 2000). Sus resultados podrían asemejarse a los obtenidos con un sistema vectorial con el algoritmo de Dijkstra, aunque (Gómez & Bosque, 1999)¹⁰⁵ nos muestran

¹⁰⁵ Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (1999): "Posibilidades y limitaciones del cálculo de caminos mínimos en IDRISI. Cálculo de rutas óptimas para el traslado de residuos tóxicos y peligrosos en el Corredor del Henares", II Reunión de Usuarios de IDRISI, Girona, 2 de julio de 1999. Citado por (Bosque Sendra & Moreno Jiménez, 2004).



sus limitaciones. Además, COSTGROW tiene la capacidad de establecer una distancia máxima para el cálculo y puede amortiguar directamente las zonas a analizar. Sin embargo, su ejecución es considerablemente más lenta en muchos casos que el algoritmo COSTPUSH. En ambos casos se requiere un archivo de lugares fuente y un archivo con los costes asociados a las celdas. Con el resultado de estos algoritmos, la función PATHWAY calcula las rutas de menor coste entre uno o varios puntos destino.

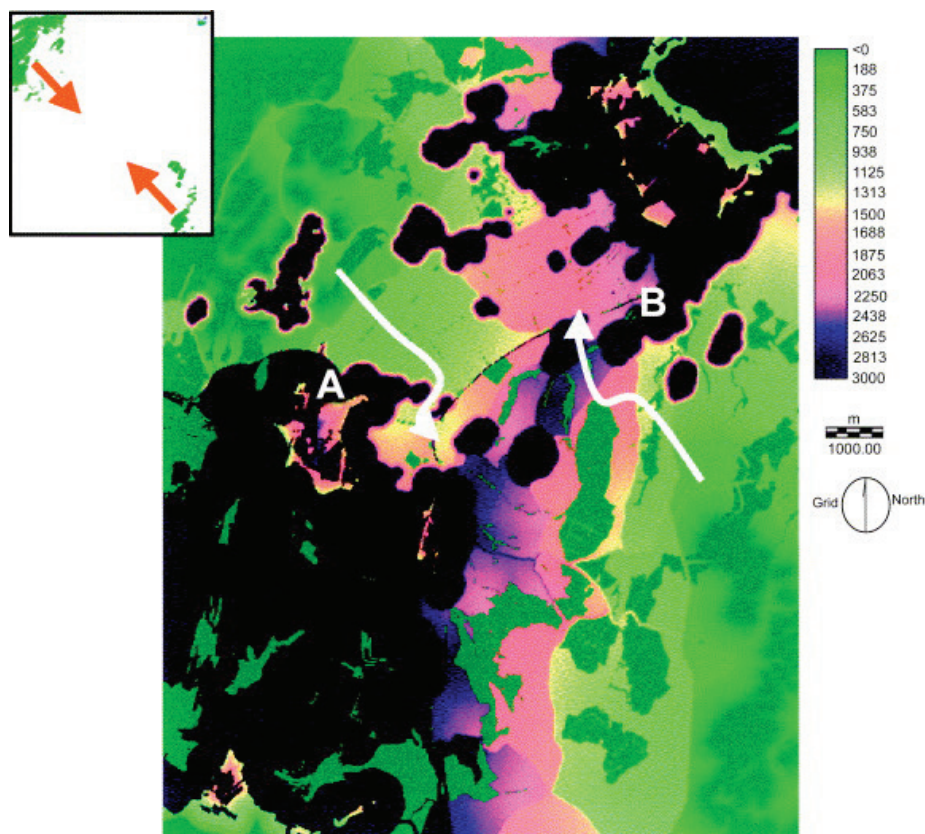


Figura 43. Aplicación de la función COSTGROW de IDRISI para el cálculo de redes ecológicas por (Prélaz-Droux & Vuilleumier, 2002)

GRASS cuenta con el módulo `r.cost`¹⁰⁶ para calcular el coste acumulado, que aplica el algoritmo como lo hemos explicado en el apartado anterior. Permite usar el patrón de movimiento de 16 celdas, aunque por defecto ofrece la opción de 8 celdas. La superficie de costes se asigna como un fichero ráster con valores enteros o reales, y la localización de las celdas fuente, puede indicarse mediante pares de coordenadas geográficas escritas sobre línea de comando, mediante un fichero de puntos vectoriales o a través de un fichero ráster donde todas las celdas con valor se entenderán como celdas fuente. Las celdas nulas podrían utilizarse en el cálculo asignándoles un coste de paso, o bien permitiendo simplemente que sean atravesadas sin generar coste adicional por ello.

El resultado de ejecutar `r.cost` será un mapa ráster donde cada celda contiene el menor coste para atravesar el espacio entre ella y las celdas fuente. Además se obtiene un mapa ráster con la dirección del movimiento entre las celdas desde los puntos asignados por el usuario. Es un proceso que puede durar mucho tiempo, por lo que se permite hacer un seguimiento detallado de los cálculos que está realizando para poder controlarlo con más detenimiento. Los cálculos terminan cuando todas las celdas consiguen el menor coste acumulado, o bien porque se alcanzan unos valores máximos fijados por el usuario, o bien se consigue obtener el coste acumulado en determinados puntos de parada que el usuario establece antes de ejecutar el modelo.

GRASS permite emplear los resultados de esta función con `r.drain` para obtener los caminos mínimos desde puntos que facilite el usuario, y las celdas fuente usadas en el modelo de coste distancia.

¹⁰⁶ Descripción de esta función escrita por Awaida, Antony y Westervelt, James en <http://grass.osgeo.org/grass64/manuals/r.cost.html>

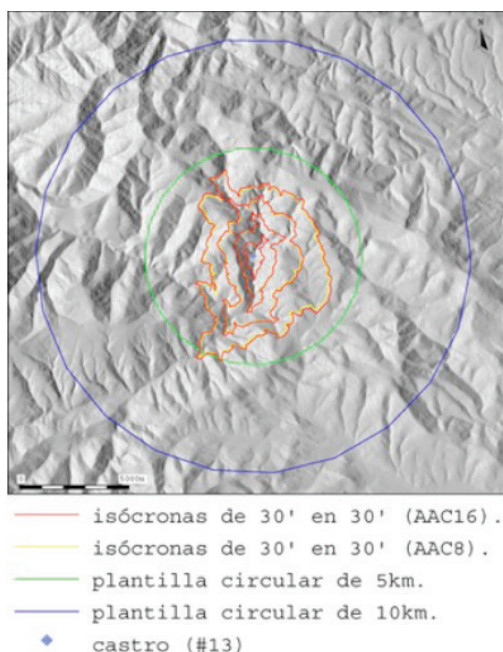


Figura 44. Comparación de polígonos de isócronas ejecutados con r.cost de GRASS por (Lage Reis-Correia, 2010)

Es interesante señalar el programa LOCALIZA¹⁰⁷ para la realización de análisis de localización de instalaciones y equipamientos (Bosque Sendra, Palm Rojas, & Gómez Delgado, 2007). Una de las tareas fundamentales que realiza es calcular matrices de distancia, por lo que se determinan superficies de costes acumulados basadas en superficies de fricción. En su primera versión publicada en el año 2000, emplea el algoritmo CostPush de IDRISI. En el planteamiento de futuras versiones realizado en 2007 se opta sin embargo por los módulos r.cost (para costes isotrópicos) y r.walk (para costes anisotrópicos) de GRASS. Además se implementan modelos de localización óptima lo que lo convierten en un verdadero sistema de ayuda a la decisión para problemas espaciales de ubicación de instalaciones, deseables o no deseables, tanto desde el punto de vista

¹⁰⁷ <http://www.geogra.uah.es/joaquin/localiza/>

de eficiencia espacial, como de justicia espacial. Entre sus funciones principales se encuentran la evaluación de la adecuación de la oferta a la demanda, el cálculo de accesibilidad de la demanda, la determinación de áreas de influencia de los centros de oferta, así como intentar resolver los problemas de asignación. Los avances de otros SIG en este campo, han superado algunas de las características de este programa (Bosque Sendra & Moreno Jiménez, Sistemas de información geográfica y localización óptima de instalaciones y equipamientos, 2012), pero su capacidad por aunar múltiples algoritmos y procesos de cálculo en una herramienta integral para abordar cuestiones tratada en este proyecto, merece ser mencionada y reconocida.



Figura 45. Ventana principal de la interfaz gráfica de la primera versión de LOCALIZA.

ARCGIS cuenta con una función que directamente se denomina COST DISTANCE. Debe suministrarse para su ejecución un archivo ráster con la superficie de costes, que recoge las fricciones unitarias que miden la resistencia a los desplazamientos, y un archivo ráster o vectorial con la ubicación de los lugares fuente. En este último caso, se hace internamente una transformación de los elementos vectoriales a un formato ráster para ejecutar el algoritmo, pero debe tenerse en cuenta previamente la resolución del ráster y el tamaño mínimo de los elementos vectoriales a representar (en el caso de que sean polígonos). Esta función tiene en cuenta las celdas sin dato, que no son tratadas



Figura 46. Mapa de los tiempos de viaje y recorridos mínimos desde centros del Campus universitario de Elviña a paradas de transporte urbano calculado con COST-DISTANCE de ArcGIS (Díaz Grandío, 2012)

SEXTANTE presenta la función Coste acumulado (isotrópico) para calcular el coste acumulado a unos puntos de origen/destino, que se definen con las celdas con valor de una capa ráster, a través de una superficie de costes uni-

Coste acumulado(isotrópico)

Parámetros | Región de análisis

Entradas

Capas raster

Coste unitario: acc_cost_output

Puntos de origen/destino: acc_cost_output

Opciones

Tipo de distancia: Euclídea

Salidas

Coste acumulado[raster]: [Guardar en archivo temporal] ...

Punto más cercano[raster]: [Guardar en archivo temporal] ...

< | origenes[reclasificado]", "0", "#", "#") | >

Aceptar Cancelar i

Figura 47. Ventana de entrada de datos para el cálculo del coste acumulado isotrópico desde SEXTANTE ejecutado desde gvSIG 1.12

Además SEXTANTE ofrece una función de cálculo de ruta de mínimo coste, con la que además de obtener el trazado de mínimo coste entre el punto seleccionado y la celda fuente más cercana, se permite asignar capas adicionales, sobre las que se hace un análisis de los valores obtenidos en el recorrido de esa ruta óptima.

3.4.2.2. Aplicaciones SIG para el modelo Coste Distancia Anisotrópico

También existen SIG que incorporan funciones para atender a las condiciones anisotrópicas de las superficies de costes, basándose en una distribución prefijada de la fricción o bien mediante una relación asignada entre la fricción y el modelo de elevación (Romo Peña & Torres Cantero, 2011), aunque suelen presentar ciertas restricciones que hacen que su uso sea limitado. Este tipo de funciones aún no lleva mucho tiempo en estos software, por lo que necesitan un período mayor de tiempo para disponer de diferentes experiencias que ayuden a subsanar su aplicación sobre casos reales. Veamos algunos de los modelos más utilizados.

IDRISI emplea la función *VARCOST* que asume una variación continua de la fricción entre la dirección de máxima resistencia y la fricción en la dirección a calcular por la diferencia entre el ángulo de esa dirección y la dirección de máxima resistencia. En la fórmula, se cuenta con una constante *k* que permite adecuar la función a diferentes terreno. Por defecto *k* vale 2.

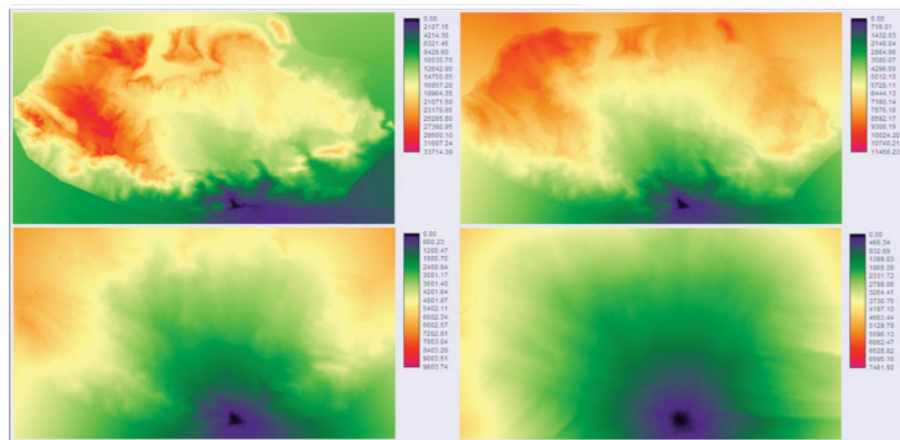


Figura 48. Ejemplo de influencia de la variación de la constante *k* (ejemplo con 0,1 – 1 – 2 – 10) en la función *VARCOST* de IDRISI, donde el incremento de *k* genera rutas más lineales como muestra (Gietl et al., 2007)

Por su lado, GRASS utiliza la función *r.walk*¹⁰⁸ (GRASS, 2011) para representar el tiempo de desplazamiento andando a partir de la fórmula de Aitken(1977)¹⁰⁹ y Langmuir(1984)¹¹⁰, que atiende a la fricción anisotrópica que se obtiene a partir de la un coste isotrópico y del modelo de elevaciones según la ecuación:

Ecuación 21

$$T = a \cdot \Delta S + \Delta H_+ + c \cdot \Delta H_- + d \cdot \Delta H_{-}$$

donde *T* es el tiempo del movimiento en segundos, ΔS es la distancia cubierta en metros, ΔH_+ es la diferencia de altitud ascendiendo, ΔH_- es la diferencia de altitud descendiendo moderadamente (entre 5° y 12°), y ΔH_{-} es la distancia vertical recorrida cuesta abajo con pendiente pronunciada (mayor de 12°). Los parámetros *a*, *b*, *c*, *d* tienen en cuenta la velocidad de movimiento para cada condición, y por defecto se utilizan los propuestos por Langmuir (0,72; 6,0; 1,9998; -1,9998) basándose en la regla de Naismith de 1892 para ayudar a calcular el tiempo de desplazamiento andando (Wikipedia, 2012). Este resultado del tiempo empleado en el movimiento debido al modelo de elevaciones, se suma al coste isotrópico considerado en el terreno en función de otros parámetros, y con ello se calcula finalmente el mínimo coste acumulado para cada celda del ámbito territorial considerado.

¹⁰⁸ Función desarrollada inicialmente por Steno Fontanari en 2002 a partir de su trabajo en *University of Trento, Italy, Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, 2000-2001. Sviluppo di metodologie GIS per la determinazione dell'accessibilità territoriale come supporto alle decisioni nella gestione ambientale.*

¹⁰⁹ Aitken, R. 1977. Wilderness areas in Scotland. Unpublished Ph.D. thesis. University of Aberdeen.

¹¹⁰ E. Langmuir. Mountaincraft and leadership. The Scottish Sports Council/MLTB., 33 Cordee, Leicester, 1984.

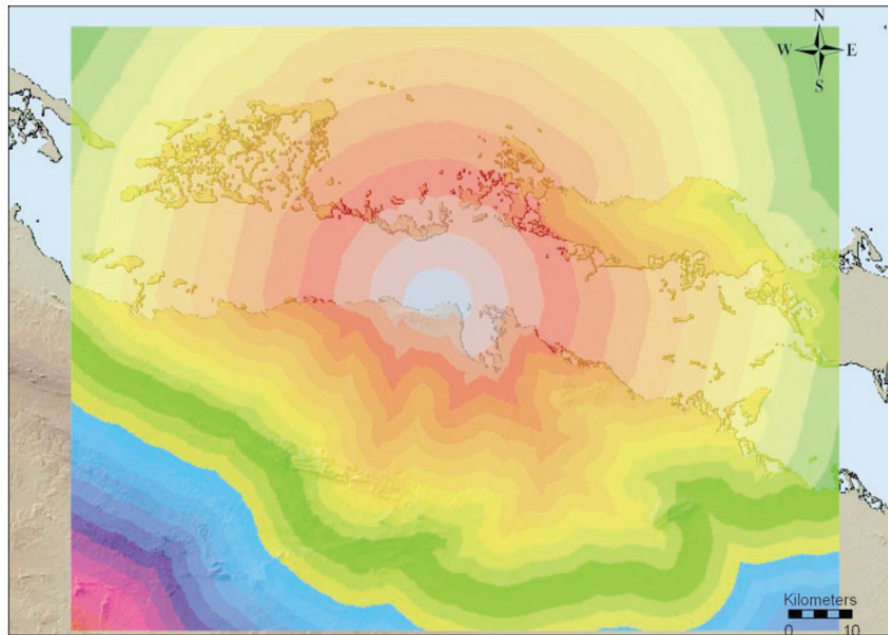


Figura 49. Mapa de tiempos en Los Buchillones (Cuba) en intervalos de 30 minutos basados en desplazamientos a pie o en canoa, calculados mediante r.walk de GRASS por (Cooper, 2010)

Por su parte, ArcGIS cuenta con la función *PathDistance* que considera adicionalmente un mapa de elevaciones para tener en cuenta la orografía del terreno en los desplazamientos, así como diferentes factores de fricción para caracterizar distintos costes que puedan afectar en el movimiento, tanto en su configuración horizontal como vertical. Con ello se permite configurar una superficie de coste anisotrópica que modeliza diferentes comportamientos de desplazamientos sobre una superficie geográfica.

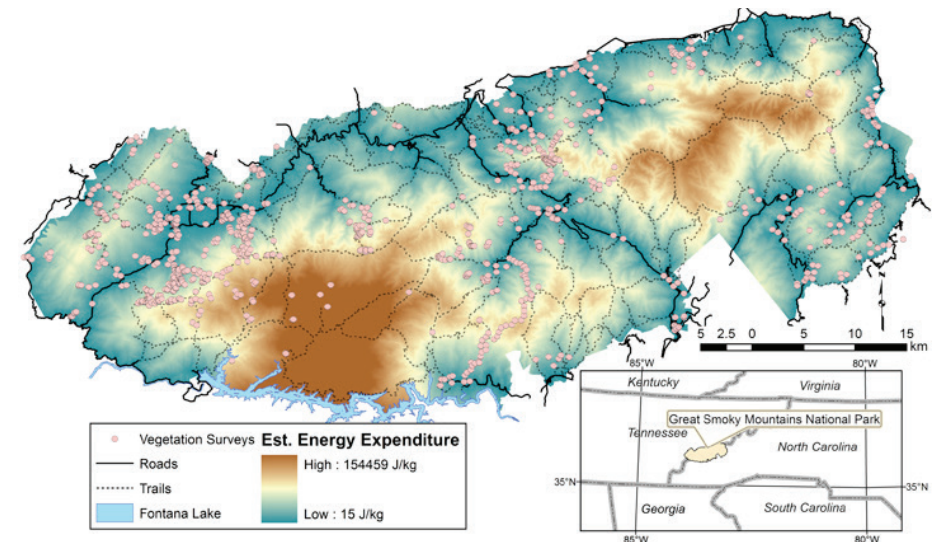


Figura 50. Empleo de la función PATHDISTANCE de ArcGIS para calcular rutas en parques por (Jobe & White, 2009)

(Gietl et al., 2007) analizan la validez de estas tres opciones sobre un terreno alpino, mostrando las diferencias notables en los resultados de los caminos óptimos obtenidos en su análisis. Comprueban que no sólo los datos con los que se confecciona la superficie de coste son importantes, sino que el algoritmo empleado para el cálculo de accesibilidad o de la ruta de menor coste, es determinante. En su estudio, la función r.walk de GRASS, al considerar el coste anisotrópico de los viajes a pie, obtenía resultados mucho más adecuados a la realidad que las funciones de las otras dos aplicaciones (Figura 51). Basándonos en esta y en otras experiencias coincidimos plenamente con la afirmación de (Yu et al., 2003) que la ruta absolutamente óptima o de menor coste, no existe, y siempre tendremos rutas relativamente óptimas en función de los algoritmos, parámetros y condiciones particulares usadas en el cálculo.

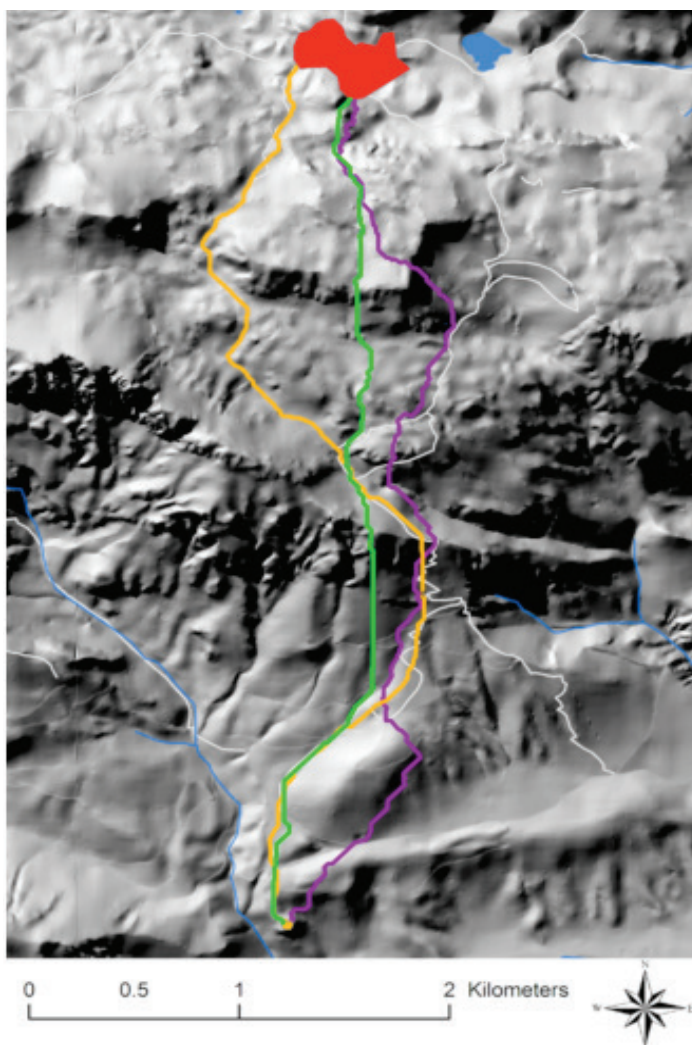


Figura 51. Cálculo de rutas de menor coste con tres programas diferentes: GRASS (naranja), ArcGIS (verde) e IDRISI (violeta). (Gietl et al., 2007)

SEXTANTE ofrece una función para calcular el coste acumulado anisotrópico basada en la ecuación

Ecuación 22

$$F_e = F_s \cos^k(\alpha)$$

donde F_s representa el coste máximo, α la dirección, y K es una constante de control del proceso. El usuario debe introducir el coste unitario máximo, la dirección de máximo coste, y la constante K . Además emplea otra función en donde la variación de los factores de coste se muestran según una tabla que fija el usuario en lugar de seguir una determinada ecuación matemática.

Figura 52. Ventana de entrada de datos para el cálculo del coste acumulado anisotrópico desde SEXTANTE ejecutado desde gvSIG 1.12

Una estrategia más general de atender al modelo anisotrópico que las anteriores es utilizar en el modelo de Coste Distancia, en lugar de un solo mapa

de superficies de costes, ocho mapas. De esta forma, para cada uno de los ocho posibles movimientos que se permiten en cada celda se dispone de un coste de desplazamiento específico en cada dirección. (Romo Peña & Torres Cantero, 2011) desarrollan este planteamiento sobre GRASS, generando un nuevo módulo `r.acost`, que añade parámetros al existente `r.cost`, para seleccionar los mapas de fricción y el mapa de direcciones de mínimo coste. Puesto que en el análisis anisotrópico el menor camino no siempre va a seguir la celda vecina de menor valor, implementan además, la función `r.adrain`, similar a `r.drain`, que permite generar el camino mínimo siguiendo la secuencia de los pasos almacenados en la función de dirección anteriormente calculada.

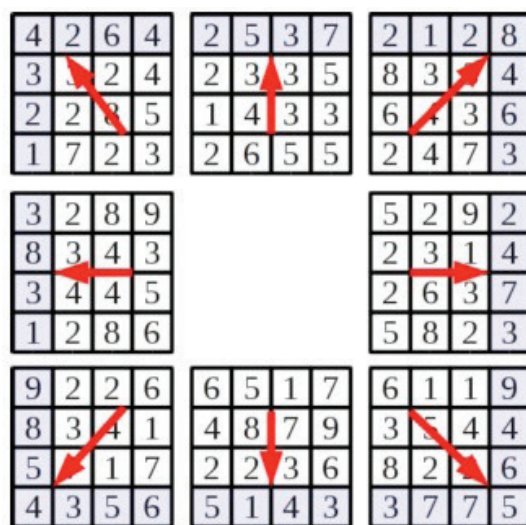


Figura 53. Ejemplo propuesto por (Romo Peña & Torres Cantero, 2011) de ocho mapas de fricción para considerar movimientos anisotrópicos en un territorio.

La implementación de este método sobre cualquier otro software SIG es factible, por lo que el modelo Coste Distancia basado en superficies de coste acumulado, permitiría su uso considerando desplazamientos isotrópicos o anisotrópicos.





4

Parametrización mediante geometría de secuencia de puntos como método de análisis de infraestructuras viarias

4.1. Consideraciones sobre un inventario de carreteras basado en geometría de secuencia de puntos

- 4.1.1. Consideraciones en cuanto a la tecnología
- 4.1.2. Consideraciones en cuanto a los datos

4.2. Parametrización puntual de las carreteras

- 4.2.1. Metodología para la tramificación de geometrías de secuencia de puntos
- 4.2.2. Funcionalidades operativas para la tramificación

4.3. Aplicación de la parametrización puntual para el análisis de la velocidad media del viario en los cálculos de accesibilidad

- 4.3.1. Cálculo de la velocidad media mediante la parametrización puntual de la información viaria
- 4.3.2. Elección del ámbito geográfico de análisis
- 4.3.3. Datos de entrada para los cálculos de accesibilidad
 - 4.3.3.1. Pendientes
 - 4.3.3.2. Infraestructuras viarias
- 4.3.4. Método de Coste Distancia sin considerar las VAC. Velocidades tipo por viario
- 4.3.5. Método de Coste Distancia sin considerar las VAC. Velocidades medias por tramo
- 4.3.6. Conclusiones sobre la parametrización puntual para el análisis de la velocidad media del viario en los cálculos de accesibilidad

4.4. Aplicación de indicadores geoespaciales de carácter puntual para el análisis técnico y funcional del Camino Francés en Galicia

- 4.4.1. Antecedentes
- 4.4.2. Objetivos del análisis de caracterización del trazado del camino
- 4.4.3. Metodología para el estudio técnico y funcional del camino
 - 4.4.3.1. Caracterización técnica mediante información geográfica puntual
 - 4.4.3.2. Indicadores geoespaciales del camino
 - 4.4.3.2.1. Indicador de seguridad vial de los trazados del camino (ISC)
 - 4.4.3.2.2. Indicador de calidad percibida de los trazados del camino (ICC)
 - 4.4.3.2.3. Indicador de análisis integrado de los trazados del camino (IAC)
 - 4.4.3.2.4. Verificación de los indicadores
- 4.4.4. Conclusiones del análisis del camino como secuencia de puntos



4. Parametrización mediante geometría de secuencia de puntos como método de análisis de infraestructuras viarias

Cualquier análisis, estudio, proyecto o planificación que se quiera realizar sobre una red de carreteras necesita manejar un importante volumen de datos procedentes de diferentes fuentes, formatos, fechas, tipologías y características muy variadas. Y no solo de las estas infraestructuras, sino también del entorno que las rodea, con datos por ejemplo sobre orografía, urbanismo, medioambiente, transporte, industria, patrimonio, economía, demografía, etc., es decir de cualquier elemento territorial que puede ser afectado o influido por la presencia de la red viaria. La variedad de datos del entorno podrá ser tan diversa y extensa como interese en función del análisis que se quiera realizar. Como hemos argumentado en la introducción de esta memoria, todos estos datos poseen una componente espacial intrínseca a su condición de elementos territoriales. Por ello, de alguna u otra forma podrían relacionarse con la red de carreteras a través de su disposición geográfica de estos elementos y los trazados viarios.

Sin considerar la información territorial del entorno, la propia carretera, como entidad geográfica individual, posee gran variedad de parámetros técnicos y funcionales, como ya hemos expuesto en el apartado 3.1.4. Parámetros que por otra parte varían o pueden variar constantemente a lo largo del trazado de estos viales, y a lo largo del tiempo. Esta obviedad es la que ha propiciado la aparición de sistemas de captación de información viaria como los comentados en el apartado 3.1.4.2. Mediante vehículos de medición equipados con diverso instrumental, a medida que circulan por las infraestructuras lineales, se miden y recogen diferentes variables, en instantes concretos repetidos en breves intervalos de tiempo. Esta información está relacionada por lo tanto, con la sección transversal de la carretera donde son adquiridos los parámetros medidos, pudiéndose organizar todos los datos almacenados mediante localizaciones geográficas que forman una geometría de secuencia de puntos. Si la velocidad de toma de datos es constante, la separación entre los puntos podrá ser equiespaciada, aunque no tendría por qué ser así.

En este capítulo presentaremos una metodología desarrollada en este proyecto de investigación para conseguir aprovechar con la mayor eficacia posible

una parametrización¹¹¹ de todas las características y variables de una carretera, siempre que se recojan mediante una geometría de secuencia de puntos. La potencialidad de este método se aplica como ejemplo de su versatilidad en dos estudios. Por un lado en el inventario de carreteras autonómicas de la Xunta de Galicia del 2006, aprovechando directamente los datos recopilados en CATVIS, como veremos en el apartado 4.3. Esta información es usada para dotar de velocidad media a los tramos de esta red viaria y aplicarla al cálculo de accesibilidad, para analizar cómo afecta esa variación de velocidad comparándolo con los cálculos de accesibilidad considerando velocidades tipo para la red autonómica. El otro ejemplo de aplicación del método de parametrización mediante geometría de sucesión de puntos, descrito en el apartado 4.4, se elabora para caracterizar los trazados del Camino Francés en Galicia, creando indicadores que analicen el estado de sus tramos.

4.1. Consideraciones sobre un inventario de carreteras basado en geometría de secuencia de puntos

Las propias características inherentes a la metodología y a la tecnología empleada para la adquisición de datos mediante estos vehículos de inspección e inventariado, así como el modelado y los procesos del tratamiento de estos datos, provocan una serie de singularidades que condicionan la aplicación esta información de forma eficiente sobre un Sistema de Información Geográfica (SIG). A continuación haremos una rápida descripción de algunos de los aspectos a tener en cuenta en función de la tecnología empleada y de los datos que permite manejar el Catálogo Visual de Carreteras (CATVIS)¹¹² sobre el que hemos podido hacer este análisis.

¹¹¹ Aunque el término “parametrización” no está recogido por la Real Academia Española (RAE) se aplica normalmente en el ámbito de la modelización matemática para definir la acción de usar parámetros. La RAE define parámetro como cualquier dato o factor que se toma como necesario para analizar o valorar una situación.

¹¹² Debe tenerse en consideración que el programa CATVIS es una aplicación comercial privada, por lo que no se ha podido disponer de toda su documentación técnica ni a la metodología seguida en los procesos de toma y tratamiento de los datos, con la que posiblemente algunas de estas consideración podrían matizarse con una nueva revisión más profunda de la tecnología

4.1.1. Consideraciones en cuanto a la tecnología

El proceso de instalación de la aplicación, así como en su configuración personalizada y puesta en marcha, es complejo y requiere un nivel de conocimientos en el programa altos, con lo que no es sencillo que varios técnicos de una misma institución puedan compartir el programa entre ellos. En la documentación manejada no se aportan datos sobre las tecnologías e instrumentación empleada en la recogida de datos, tratamiento y almacenamiento que permitan conocer su procedencia, tolerancias, fiabilidad, etc.

La base de datos para almacenar toda la información es Microsoft Access. Esta base de datos es un componente de la suite Microsoft Office, de carácter privativo y sólo disponible para el sistema operativo Windows, que requiere su instalación adicional al CATVIS. Esto limita el trabajo con el CATVIS solamente a este tipo de plataformas dejando fuera otros sistemas. Por otro lado, al ser un entorno amigable para el usuario no técnico, el acceso a la información es intuitivo y simple, pero en cuanto a volumen de datos o de número de usuarios es muy inferior comparado con otros gestores de bases de datos, al estar pensado para entornos pequeños con pocas exigencias técnicas.

El modelo relacional empleado favorece una mejor estructuración de los datos, así como un ahorro de espacio de almacenamiento. La lógica empleada para esta división en tablas, aunque podría estructurarse de otra forma, parece conveniente y se adapta bien a los conceptos reales a los que hace referencia. Sin embargo, también provoca una mayor complejidad a la base de datos. En ocasiones es dificultoso encontrar cierta información entre las todas las tablas y no siempre está bien detallado el contenido que se encuentra en su interior. Estas características, unido a la gran cantidad de datos manejados, hacen que ciertos cruces de tablas sean muy costosos computacionalmente, y además provoquen resultados incorrectos, inesperados o no deseados.

CATVIS no contempla mecanismos nativos del programa para poder exportar los datos a otros formatos, por lo que la extracción de datos queda supeditada

empleada. El análisis realizado se basa en la revisión de la versión de 2007 con datos de las carreteras autonómicas de Galicia de 2006.



a programas ajenos para hacer la exportación de datos. Hay que se permiten realizar consulta alfanuméricas, estas tampoco se puede extraer para usarlas en análisis con otros programas, lo que lleva a un uso menos provechoso del que se podría, en gran cantidad de información existente. Tampoco se pueden realizar consultas espaciales y otros geoprosesamientos, lo que impide obtener las relaciones entre las carreteras y otros elementos del territorio, mermando mucho la potencia del sistema.

En cuanto a las opciones de visualización gráfica de los datos aportados por el software de CATVIS, éstas son escasas bajo el prisma de una persona familiarizada con los Sistemas de Información Geográfica (SIG). No se puede cambiar ningún parámetro de representación visual, ni elaborar mapas de impresión o personalizados. El manejo geográfico de los datos es pobre respecto a posibilidades de ajustes básicos como el zoom, la carga de otros datos de otras fuentes, etc. Por otro lado, la gran cantidad de datos hace que su plasmación en pantalla sea costosa por los programas SIG, siendo algunos incapaces incluso de realizar una carga completa de todos los datos. Además, en los SIG que lo permiten, la renderización de tantos datos puntuales resulta compleja y se producen grandes retardos a la hora de hacer un “pan” o zoom.

4.1.2. Consideraciones en cuanto a los datos

La cantidad de datos es enorme. En principio, parece que la abundancia de información siempre es positiva mientras exista suficiente espacio para su almacenamiento, pero un exceso hace que el sistema, si no está convenientemente tratado, se vuelva poco manejable. Así, ciertas operaciones y consultas realizadas contra Access provocan un gran coste computacional y temporal. Del mismo modo, el peso de los archivos suele ser elevado y esto obliga a tener un gran espacio de disco dedicado. Como consecuencia de este gran tamaño, el análisis y extracción de conclusiones de los datos es difícil y requiere un mayor despliegue de recursos. Y lo mismo ocurre si se necesita enviar esta información a otros usuarios.

Este volumen está provocado en parte, por la redundancia de algunos datos, la alta frecuencia de muestras, la existencia de atributos no usados vacíos,

atributos con un tamaño excesivo, etc. Además, existen ciertos parámetros que aunque se definen en la estructura de las base de datos no aparecen recogidos y almacenados por lo que provocan un aumento del tamaño de la base de datos con valores vacíos. Otro aspecto que contribuye al gran tamaño de los ficheros de trabajo es la naturaleza puntual de la información, que hace que se tenga que emplear un registro en cada medición a pesar de que los valores no cambien durante tramos de decenas de puntos o más. Un gestor de base de datos más robusto paliaría en parte el problema, y permitiría además implementar metodologías más interesantes, como la segmentación dinámica (Demirel, 2002) (Aliseda Pérez de Río, Crespo del Madrid & Yarza Álvarez, 1998), para evitar repetir datos innecesarios para todos los puntos de un mismo tramo. En PostGis¹¹³, la empresa iCarto ha desarrollado un interesante proyecto en este sentido con la red de carreteras de la provincia de Lugo, como ya comentamos en el apartado 2.6.2.

Muchos de los valores que se recogen en la base de datos no cuentan con una documentación detallada que explique de forma exacta lo que representan. No existen por tanto definiciones exactas de términos que pueden ser ambiguos, imprecisos o incluso desconocidos. Un ejemplo de ello es el ancho de plataforma que en el CATVIS, a la vista de los datos, se interpreta como la suma del ancho de calzada más los anchos de arcén izquierdo y derecho. Esta interpretación discrepa de la definición que se usa en la Normativa de Trazado de Carreteras (Norma 3.1-IC de Trazado) donde la plataforma incluye también las bermas. Otro ejemplo sería el campo “travesía”. Según el Reglamento General de carreteras (R.D. 1812/1994) una travesía es la “parte de tramo urbano en la que existan edificaciones consolidadas al menos en las dos terceras partes de su longitud y un entramado de calles al menos en uno de los márgenes.” CATVIS utiliza otro criterio, aparentemente basado en los carteles de nombre de población y de límites de velocidad.

La distancia entre los elementos de la carretera, puede medirse en CATVIS mediante varias formas. El campo “Distancia”, así como “PKHito” y “PKDist”, son

¹¹³ <http://postgis.net/>

atributos que miden los puntos kilométricos (PK) indicando en cada momento en qué lugar se encuentra en la carretera. Pero es frecuente que existan desajustes entre sus valores que provocan la no correlación que deberían tener ambas distancias. Si bien es cierto que en la gestión de las carreteras se trabaja con puntos kilométricos fijos instalados físicamente en las vías, y que en muchas ocasiones no coinciden con la distancia real que hay entre ellos, la relación entre el PK y la distancia real debe plantearse mediante procedimientos más complejos, como la segmentación dinámica, y no mediante una secuencia lineal desde un PK hasta el siguiente, como se hace en CATVIS (Figura 54).

IdCalzada	Pk_Hito	Pk_Dist	Distancia	Num Carr	Plataforma	Arcen
1	1	95	1950	2	100	
1	1	96	1960	2	100	
1	1	97	1970	2	100	
1	2	0	1980	2	100	
1	2	1	1990	2	100	
1	2	2	2000	2	86	
1	2	3	2010	2	86	
1	2	4	2020	2	99	
1	2	5	2030	2	99	
1	2	6	2040	2	98	
1	2	7	2050	2	100	
1	2	8	2060	3	105	
1	2	9	2070	3	108	
1	2	10	2080	3	110	
1	2	11	2090	3	116	
1	2	12	2100	3	121	
1	2	13	2110	3	129	
1	2	14	2120	3	135	

Figura 54. Ejemplo de no correlación en las distancias

Además, si realizamos una medida entre cada 2 puntos de los más de 500.000 puntos recogidos para la red viaria autonómica de Galicia¹¹⁴, observamos que la distancia euclídea entre dichos puntos no es exacta, debido a errores de precisión del GPS, de la inclinación del terreno, error de simplificación, etc., variando

¹¹⁴ <http://www.cmati.xunta.es/catalogo-de-estradas>

entre 0 y 39,6 metros. En algún caso, se han detectado desajustes claros en la frecuencia de la toma de datos en campo (Figura 55). La distancia media entre los puntos se sitúa sin embargo en un valor muy próximo a 10, quedando en 10,013 m.

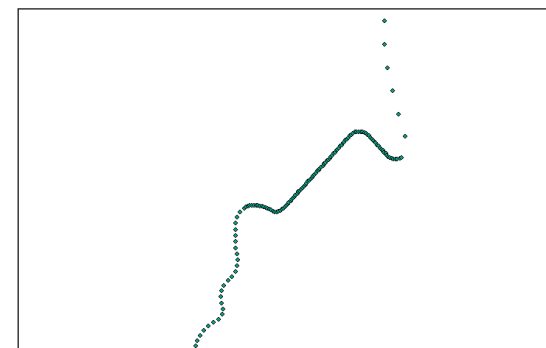


Figura 55. Desajustes en la frecuencia de toma de datos PO-235 (Km 18)

Otro de los problemas geométricos existentes es la falta de conectividad geométrica de las carreteras. Esto conlleva, que si se intenta representar cada carretera como una línea uniendo todos los puntos que la identifican, aparecerá como una entidad aislada pues no llegará a conectar con las líneas de las carreteras con las que se une (Figura 56). Este comportamiento impide usar técnicas para análisis de redes, a no ser que se haga un ajuste topológico exhaustivo de todas las conexiones.

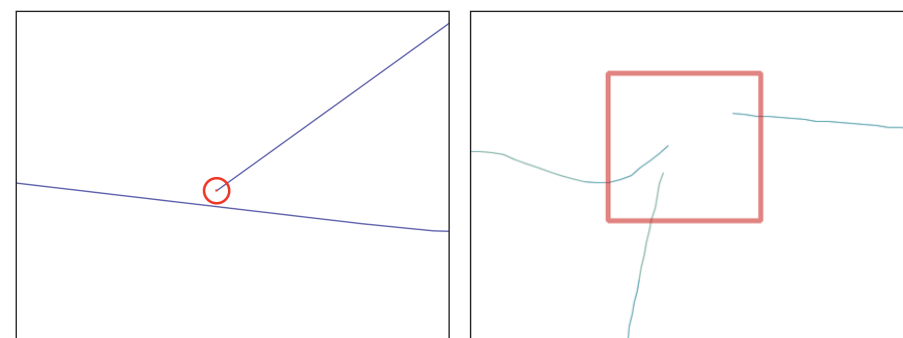


Figura 56. Ejemplos de inexistencia de topología en la red de líneas generada.



Se han detectado también casos en los que el recorrido del vehículo de toma de datos, no es lineal respecto al eje de la carretera, sino que se producen algún cambio de sentido. Esto provoca que al tramificar esos tramos la geometría se vea afectada.

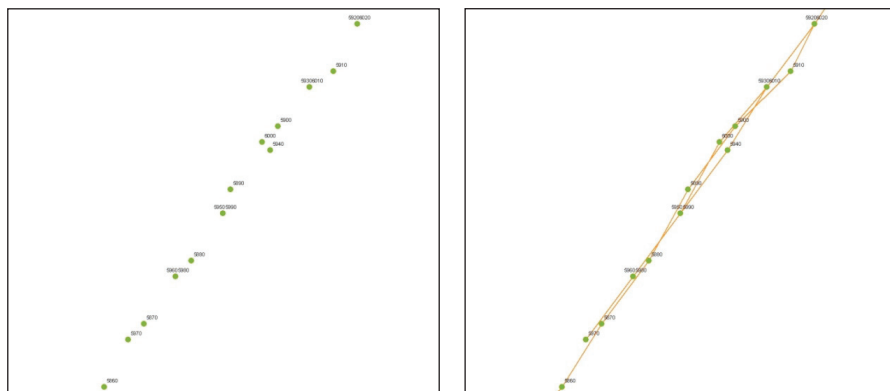


Figura 57. Ejemplo de recorrido no-lineal en la recogida de puntos correspondientes a la vía PO-230 y errores provocados en la creación de entidades lineales.

La precisión en la toma de datos y la frecuencia de la que ya se ha hablado, producen una gran variedad de valores que pueden ser muy diferentes entre muestras consecutivas. Esto provoca que si se definen unos rangos de valores para su representación visual con diferentes colores, se produzcan frecuentes cambios con lo que la imagen queda sobrecargada (Figura 58). Al tener distancias de 10 metros entre las geometrías representadas, los colores se superponen impidiendo apreciar verdaderamente las condiciones de la calzada.

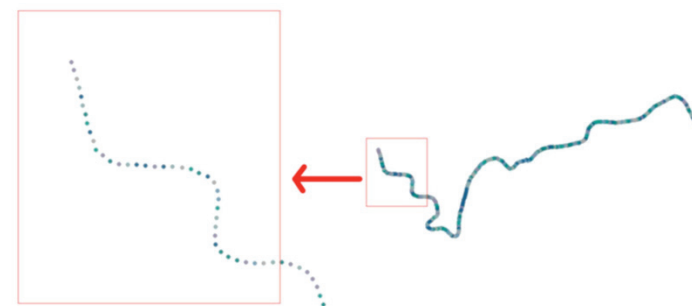



Figura 58. Mezcla de colores de representación por los cambios frecuentes de características de los tramos (Varela García, Varela García, Lorenzo Tarrío, & Borobio Sanchiz, 2008)

En cuanto a problemas concretos encontrados en los datos analizados de los más de 500.000 puntos de la red autonómica de 2006, se constatan los errores identificados en la Tabla 6.

Tabla 6. Problemas identificados en los datos del CATVIS de la red autonómica gallega de 2006.

Tabla	Error
Geometría	97 ptos tienen coordenadas X e Y=0
Geometría	La longitud final de las carreteras no coincide con la que debería de ser por número de puntos
Geometría	Da ardenes derechos en autovías=0, corresponden a las zonas donde existe carril de incorporación
Enlaces	Al unir la tabla de la geometría con la de enlaces se pierden aproximadamente la mitad de los enlaces (13334 enlaces, y quedan 6815)
IRI	Existen puntos con información duplicada (2164 ptos) y triplicada (2603)
IRI	Existen puntos (aprox. 2000 ptos) que no se corresponden a ningún punto de la tabla geometría
Tráfico	Existen dos tramos de asignación de IMD con dato de DistanciaF=0



Como se puede observar, simplemente mostrar la información almacenada sobre un SIG permite hacer un control de calidad muy preciso sobre los datos viarios aportados por los sistemas de inventariado de carreteras. La componente espacial no solo permite realizar análisis de gran interés, sino que ofrece la posibilidad de comprobar la validez de datos territoriales que sin una representación cartográfica adecuada, podrían ocultar errores y defectos, de otro modo muy difíciles de encontrar.

4.2. Parametrización puntual de las carreteras

La enorme cantidad de información obtenida en la recopilación puntual de los parámetros técnicos que caracterizan una carretera, como por ejemplo hace el sistema CATVIS, hace necesario tratar previamente esta información para que pueda representarse cartográficamente en un Sistema de Información Geográfica. En el caso de la red autonómica gallega (que usaremos como ejemplo), con una longitud superior a los 5.000 km, el número de puntos almacenados en la base de datos es superior al medio millón, lo que implica problemas en su manejo, como hemos detallado en el apartado anterior.

Lo más evidente para simplificar los datos es convertir la sucesión de puntos que representa una carretera en la geometría más común a la hora de graficar un trazado viario, es decir, una línea. Sin embargo, en este caso convertir la información puntual en información lineal, no es un proceso trivial si se quieren conservar todos los parámetros que caracterizan la carretera. Debido a la diversidad de campos temáticos recogidos y de la variedad de valores diferentes en los mismos, los tramos con información homogénea que se generarían manteniendo todos los parámetros, serían tan pequeños que su longitud media no superaría en mucho a los 10 metros que separan los puntos de información base.

Si por el contrario se opta por considerar cada carretera como una sola línea, se simplificarían enormemente los datos gráficos, pues en ese caso solo se tendrían unas 500 entidades gráficas frente al medio millón de geometrías puntuales. Pero en esta transformación se pierden todos los matices de las

carreteras, pues tendríamos que buscar fórmulas para convertir la diversidad de los valores de cada parámetro, en una sola para la nueva geometría lineal. Opciones como hallar la media, el valor máximo, el mínimo, etc. podría hacerse en el caso de campos numéricos. Pero no siempre, pues por ejemplo si para una calzada en la mitad de su recorrido no existen arcenes, y en la otra mitad presenta arcenes de 3 metros, el valor medio no tendría ningún sentido, y al dar una cifra concreta, se estaría perdiendo la información de aquellas zonas donde no existen arcenes. Para el caso de tener parámetros que almacenen datos de texto, conservar uno representativo para la carretera de entre todos los existentes en ella, requiere un cuidadoso análisis, y no siempre se conseguirán resultados satisfactorios.

4.2.1. Metodología para la tramificación de geometrías de secuencia de puntos

Para evitar la pérdida de información, debemos recurrir a un procedimiento que permita realizar diferentes tramificaciones del viario, adaptando cada una de ellas al análisis que se quiere realizar en cada momento. De esta forma mantendremos una base de datos con toda la información puntual y en función de las necesidades, se procedería a construir aquellas geometrías lineales con la información concreta que fuesen preciso analizar. Para realizar esta tarea de la forma más sencilla, se procede primeramente a generar una tabla con toda la información necesaria sin necesidad de recurrir a tablas de información diversa. En el caso de operar con CATVIS hemos realizado la asociación de campos según se indica en la Tabla 7.

Para asignar los valores de cada parámetro previamente, es preciso representar de forma gráfica sobre el SIG su ubicación como elemento puntual, a partir de las coordenadas UTM X e Y, o las coordenadas geográficas de ese lugar, y que están recogidos en las tablas originales. Esta información es el punto clave de todo el proceso. Si el inventario de carreteras no cuenta con este dato, es más complicado conseguir georreferenciar los parámetros, aunque por medio de datos de distancias, Pks, u otras información se podría intentar conseguirlo.

Tabla 7. Atributos asociados a la base de puntos de las carreteras autonómicas y relación de los mismos entre CATVIS y la entidad de geometría puntual del SIG. En esta tabla CV significa que procede de la información de CATVIS.

Atributo	Fuente	Nombre campo CATVIS	Nombre campo SIG	Tipo de dato	Tamaño
Identificador de carretera	CV: A-Tramos	IdCtra	IdEstrada	Entero	6
Identificador de tramo/calzada	CV: Geometría	IdTramo	IdCalzada	Entero	3
Pto kilométrico hito	CV: Geometría	PKHITO	PK_Hito	Entero	3
Distancia al pto kilométrico	CV: Geometría	PKDIST	PK_Dist	Entero	4
Distancia al origen de tramo	CV: Geometría	DISTANCIA	Distancia	Entero	6
Número de carriles	CV: Geometría	Nº_de_Carr	NumCarr	Entero	3
Ancho de plataforma (calzada+arcén dcho+arcén izq)	CV: Geometría	Plataforma	Plataforma	Entero	3
Ancho de arcén izquierdo	CV: Geometría	Arcén_Dere	ArcenDto	Entero	3
Ancho de arcén derecho	CV: Geometría	Arcén_Izq	ArcenEsq	Entero	3
Ancho de calzada	CV: Geometría	Calzada	Calzada	Entero	3
Radio de curvatura	CV: Geometría	Radio_de_C	RadioCurv	Entero	5
Peralte	CV: Geometría	Peralte	Peralte	Entero	5
Pendiente	CV: Geometría	Pendiente	Pendente	Entero	5
IRI máximo	CV: IRI	IRI_IZQ	IRI_med	Entero	5
Marca viaria de adelantamiento	CV: Marcas viales	Codigo	Adiantar	Texto	2
Travesía	CV: Poblaciones	Codigo	Travesia	Texto	2
Identificador de red	CV: A-Carreteras	IdRed	IdRede	Entero	2
Identificador de subred	CV: A-Carreteras	IdSubred	IdSubrede	Entero	2
Código de carretera	CV: A-Carreteras	Carretera	CodEstrada	Texto	10
Abreviatura código carretera	CV: A-Tramos	AbrevNew	Abrev	Texto	10
Enlaces	CV: Enlaces		Enlaces	Texto	2
Carretera Enlace	CV: Enlaces		EnlaceTit	Texto	4
Carril Lento	CV: Vias		CarrLento	Texto	2
Marca de borde calzada	CV: Marcas viales		MarcaBorde	Texto	2
Identificador de número de Enlace	-		CodEnlace	Entero	
Identificador de TCA (tramo concentración accidentes)	Memoria accidentes Xunta 06		TCA	Entero	3
IMD del año 2005	CV: Tráfico		IMD	Entero	10
Porcentaje de pesados	CV: Tráfico		Pes_porcen	Entero	3
IMD Ligeros	Calculado a partir de dato CV		IMD_Lix	Entero	6
IMD Pesados	Calculado a partir de dato CV		IMD_Pes	Entero	3
Accesos por Km	Calculado a partir de dato CV		Accesos_Km	Doble	5/2
Prohibición de adelantar	Calculado a partir de dato CV		Proh_adel	Doble	5/2
Código Provincia	Asignación propia		Provincia	Entero	2

Cada uno de los nuevos registros en la nueva base de información, identificará a un punto geográfico concreto del viario y sobre él se asignarán todos los valores de los parámetros medidos en ese lugar. Para hacer correctamente esta asignación es preciso incorporar un campo clave como identificador único de cada uno de las geometrías puntuales y de sus variables. Este campo clave debe estar basado en elementos existentes en todas las tablas que se vayan a utilizar. En el caso del CATVIS los campos usados son IdTramo, PkHito, PkDist y Distancia, y las coordenadas UTM X y UTM Y se obtienen de la tabla Geometría.

Las asignaciones de valores desde las tablas de CATVIS a los campos de la nueva entidad de geometría puntual del SIG, y también para posteriormente hacer también las transformaciones de geometría puntual a geometría lineal, se realiza mediante la herramienta de software denominada XAEL (Xerador Avanzado de Entidades Lineales), que ha sido desarrollada para este fin en el Cartolab. XAEL facilita la consecución de procedimientos que también podrían ejecutarse mediante procesos elaborados desde el SIG o directamente desde el sistema gestor de datos, aunque de una manera más tediosa y complicada. XAEL trabaja sobre una base de geometría de puntos a la que se le puede asignar datos procedentes de otras tablas de diferentes bases de datos, mediante dos procedimientos:

- **Asignación puntual:** para cada campo de atributos asociado, se copia el valor de cada uno de los registros con campo clave coincidente. Es la función unión normalmente usada en la relación entre tablas de datos alfanuméricas. Esto sucede por ejemplo para todos los campos de la tabla Geometría (Figura 59).

IdTramo	PKHito	PKDist	Distancia	UTM X	UTM Y	UTM Z	Nº de Carriles	Plataforma	Arcén Izquierdo	Calzada
1	0	0	0	598898	4683976	407	2	93	10	77
1	0	1	10	598905	4683984	407	2	96	10	80
1	0	2	20	598912	4683991	407	2	98	10	82
1	0	3	30	598919	4683998	408	2	101	10	85
1	0	4	40	598926	4684006	408	2	105	10	89
1	0	5	50	598933	4684013	409	2	108	10	92
1	0	6	60	598940	4684020	409	2	111	10	95
1	0	7	70	598946	4684027	413	2	113	10	97
1	0	8	80	598954	4684034	413	2	118	10	102

Figura 59. Tabla "geometría" de CATVIS.

- **Asignación por tramos:** para cada campo de atributo asociado, se indica la distancia inicial y la distancia final, lo que implica que se copia ese valor para todos los registros con campo clave coincidente, que cumplan la condición de encontrarse entre esos dos valores de distancia (Figura 60).

	IdTramo	PKIHito	PKIDist	PKFHito	PKFDist	DistanciaI	DistanciaF	Campaña	IRI der	IRI izq
	535	25	103	25	112	0	10	2003	219	262
	575	66	93	67	4	0	40	2006	183	138
	468	0	0	0	4	0	40	2005	321	321
	527	0	0	0	5	0	50	2005	319	326
	575	67	23	67	32	0	50	2003	121	113
	82	6	600	6	607	0	70	2003	280	261
	229	0	0	0	10	0	100	2006	407	347
	563	0	0	0	10	0	100	2006	422	391
	326	0	2	0	12	0	100	2006	460	390
	556	0	0	0	10	0	100	2006	835	766

Figura 60. Tabla "IRI" de CATVIS

Además de los valores asignados directamente desde otra base de datos mediante los dos procedimientos comentados, pueden asignarse también otros datos procedentes de otras fuentes diferentes (por ejemplo, el número de accidentes en determinados lugares), o calculados a partir de los datos existentes (por ejemplo, el número de vehículos pesados a partir de los valores del CATVIS de la IMD-Intensidad Media Diaria- y del porcentaje de este tipo de vehículos). También pueden añadirse parámetros más complejos, como el número de accesos por km o la prohibición de adelantar, que requieren aplicar diferentes cálculos sobre los datos alfanuméricos y ciertos geoprocementos sobre la componente espacial. Estos análisis se realizan de forma independiente y posteriormente se asignan los resultados obtenidos. Con todo ello, finalmente se obtiene una entidad geográfica basada en puntos, que sirve como base para la caracterización de toda la red de carreteras que se considere (Figura 61).

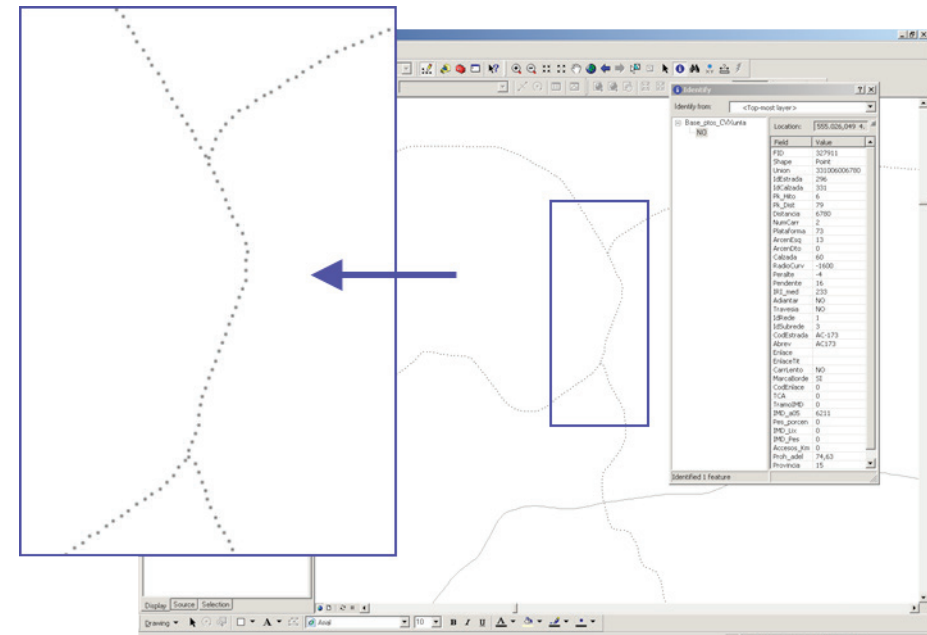


Figura 61. Entidad geográfica base de geometría puntual obtenida en el proceso de asignación de atributos de las infraestructuras viarias.

Una vez generado el archivo SIG de la entidad geográfica que recoge la información global de todas las carreteras sobre las que se quiere trabajar, se puede proceder a realizar las tramificaciones necesarias para generar entidades lineales a partir de entidades puntuales. La clave para la transformación de toda esta información a un formato específico de SIG de un modo rápido y eficaz es aprovechar el carácter secuencial de los datos de partida, logrando una operatividad de cálculo con un bajo coste computacional. Las herramientas de XAEL recorren la totalidad de la base de datos, punto por punto, de un modo secuencial, operando con los campos involucrados en su tramificación, realizando cálculos matemáticos y editando las geometrías. Podrán aplicarse diferentes criterios para establecer la división de los tramos, bien a través de elementos concretos que fijen un punto de corte, o bien mediante la asignación de características homogéneas que identifiquen un tramo y lo diferencien del siguiente.

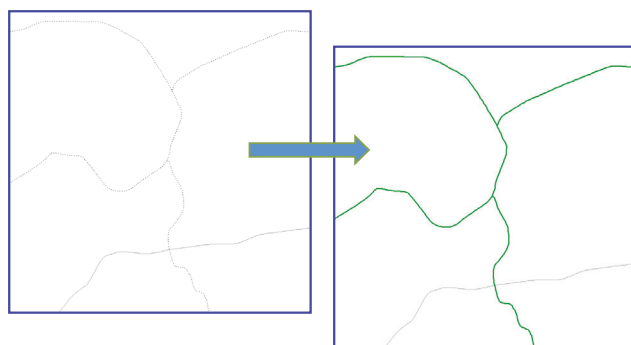


Figura 62. Transformación de elementos puntuales en elementos lineales

- **Tramificación por valores** (Figura 63): se transforma la red de carreteras de puntos a líneas en función de los registros consecutivos de valores de un campo. Por ejemplo, el número de carriles.



Figura 63. Transformación "por valores": número de carriles

- **Tramificación por rangos** (Figura 64): se transforma la red de carreteras de puntos a líneas en función de una serie de rangos definidos para algunos de los parámetros. Por ejemplo, en el caso de anchos de calzada, donde se establecen los rangos: < 5m, 5-6m, 6-7m y ≥7m.



Figura 64. Transformación "por rangos": ancho de calzada

- **Tramificación por cambios de signo** (Figura 65): se transforma la red de carreteras de puntos a líneas en función de los cambios de signo de un determinado valor y se aplica a ese tramo el dato que se considere apropiado (máximo, mínimo, media). Por ejemplo, en el análisis del atributo pendiente, donde se puede transformar de entidades puntuales a entidades lineales a partir de los valores de cambio de signo del valor "pendiente", y posteriormente asignar a cada tramo el valor máximo del atributo pendiente para ese tramo.

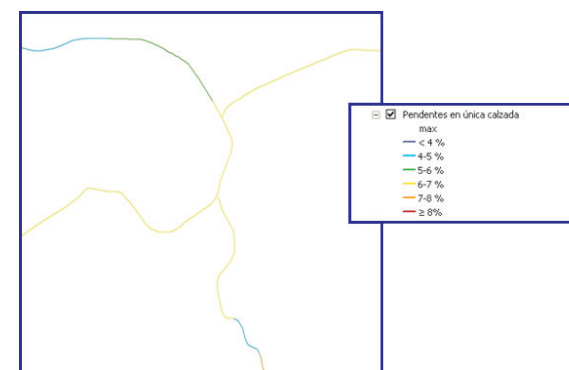


Figura 65. Transformación "por cambios de signo": pendientes

- **Tramificación por punto de corte** (Figura 66): se transforma la red de carreteras de puntos a líneas, a partir de puntos de corte definidos por el usuario, como por ejemplo enlaces con otras carreteras, y se aplica a ese tramo el dato que se considere apropiado (máximo, mínimo, media) para los campos que se concreten. Por ejemplo, en el análisis del atributo radio de curvatura, se puede analizar mediante puntos de corte utilizando los enlaces, y posteriormente se asigna a cada tramo el valor mínimo del radio de curvatura para ese tramo.

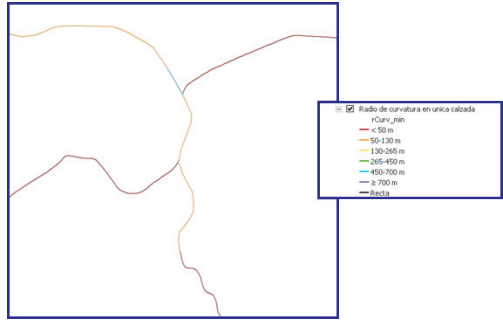


Figura 66. Transformación “por puntos de corte”: radios de curvatura

- **Tramificación mixta** (Figura 67): se transforma la red de carreteras de puntos a líneas, a partir de la combinación de dos de los criterios anteriores. Por ejemplo, en el análisis de los niveles de servicio, se puede transformar la red por puntos de corte utilizando los enlaces y por valores, en función de si los tramos se corresponden a travesías o no.

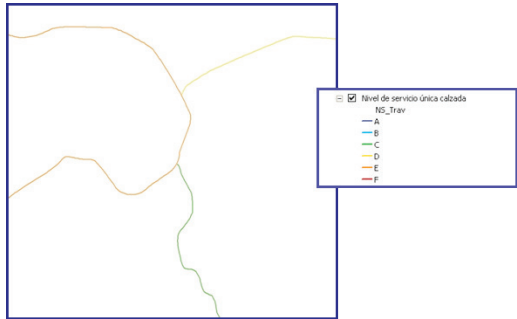


Figura 67. Transformación “mixta”: niveles de servicio

- **Tramificación por número de vértices**: que permite generar tramos de la misma longitud, fijada por el usuario.

Aplicando estas transformaciones a la red de carreteras autonómicas de Galicia se consiguen tramificaciones muy diferentes como puede comprobarse en la Tabla 8. La longitud menor de los tramos demuestra como la distancia base entre los puntos almacenados en los datos de CATVIS no siempre cumple el criterio de mantenerse a 10 metros. Cada parámetro de análisis tiene unas consideraciones concretas que deben atenderse en un estudio serio sobre las carreteras, por lo que se requiere un tratamiento específico para obtener la tramificación adecuada.

Tabla 8. Resultados de transformaciones de entidades puntuales a entidades lineales

TIPO DE TRANSFORMACION	ANÁLISIS	NÚMERO DE TRAMOS	LONGITUD DE TRAMOS			DESVIACIÓN (m)
			MENOR (m)	MAYOR (m)	MEDIA (m)	
Valores	Titularidad	516	89,51	108.314,34	10.425,80	13.828,81
	Nº carriles/calzada	5.744	7,07	50.072,45	936,58	2.918,13
	Travesías	3.309	9,22	41.126,22	1.625,78	2.485,09
	Carril Lento	1.143	9,43	95.987,08	4706,67	7.742,85
	Adelantamiento	14.811	6,04	22.462,58	363,22	983,59
	Marca de borde	1.126	9,22	72958,61	4777,72	8399,64
Rangos	Ancho arcén	19.906	5,10	39.639,89	270,25	1.227,93
	Ancho calzada	7.052	5,83	56.829,54	762,86	2.554,41
	Ancho plataforma	17.506	2,00	24.375,35	307,31	906,47
	IRI	13.642	8,49	21.229,16	394,35	791,19
Cambios de signo	Pendientes	5.807	8,94	14.160,73	923,42	1.199,54
Puntos de corte	Radio de curvatura	7.323	7,62	14.540,04	734,63	973,94
Mixto	Tráfico	9.654	7,62	10.251,58	557,25	747,21
	Travesías por IMD	4.746	0	4268,22	352,02	366,42

Un ejemplo de tramificación por número de carriles puede apreciarse en Figura 68 y Figura 69.

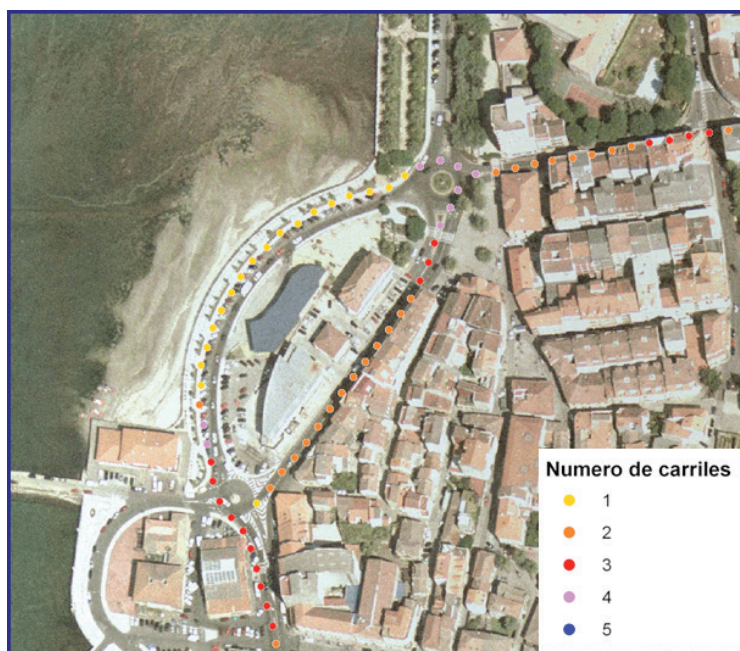


Figura 68. Representación de puntos por número de carriles en el núcleo de Cambados.

En el proceso de tramificación se permite incorporar un análisis de ligeras variaciones en los datos de la secuencia de puntos, de forma que si los cambios que significan crear un nuevo tramo no se mantienen durante un número determinado de puntos, se consideran dentro del mismo tramo en que se estaba creando. De esta forma se evitan construir multitud de pequeños tramos aislados que únicamente generan confusión en los resultados. Como ejemplo, una tramificación de los 534.000 puntos de las carreteras de la Xunta de Galicia en función del número de carriles y del ancho de plataforma genera 23.115 tramos sin atender a las variaciones y de 8.565 tramos considerando su efecto.

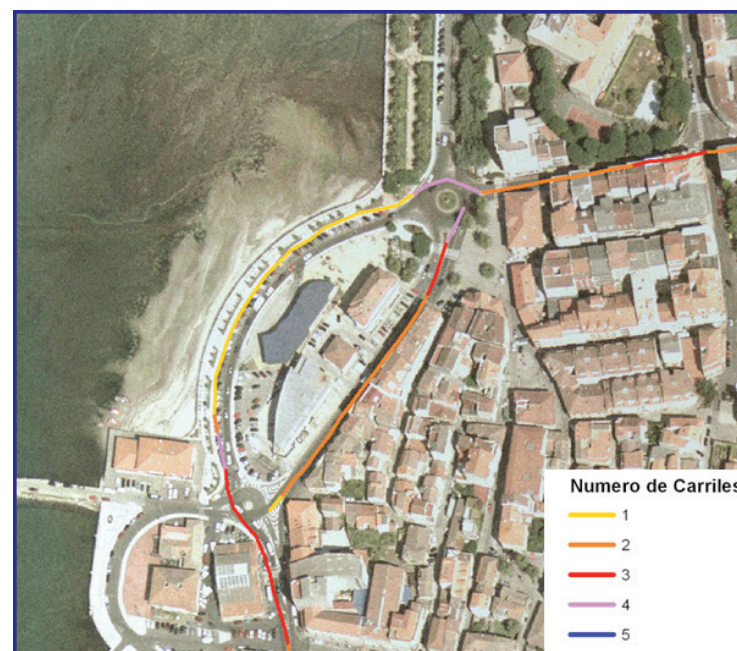


Figura 69. Representación de tramos por número de carriles en el núcleo de Cambados.



Figura 70. Tramificación sin atender a pequeñas variaciones en la serie de valores de los puntos (imagen de la izquierda) y tramificación considerando las pequeñas variaciones dentro del tramo en construcción (imagen de la derecha).

4.2.2. Funcionalidades operativas para la tramificación

El proceso de tratamiento de los datos seguido desde XAEL, es capaz de transformar los datos contenidos en una base de datos basada en información puntuales, a datos listos para ser consumidos por programas SIG. Ofrece además una serie de funcionalidades que añaden más valor a la información de partida, permitiendo obtener nuevos datos que serán incluidos en los elementos geográficos creados. No se trata simplemente de extraer datos de un formato o de una estructura a otra, sino que se puede modelar y operar con los datos consiguiendo funcionalidades más versátiles para la creación de líneas tramificadas por múltiples valores.

XAEL es una herramienta software independiente, es decir, no necesita de ningún software que lo contenga, y está programado íntegramente en Java. Funciona en distintos sistemas operativos (testado bajo Windows y Linux) con versiones de JVM 1.4 y superiores. Para su implementación, se han usado las librerías de software libre GeoTools2 y JTS (Java Topology Suite). Cuenta con una interfaz gráfica sencilla (creada con Swing extendido con la librería Buoy) para la interacción con el usuario basada en una ventana principal donde se presentan las herramientas (Figura 71). Admite como entrada bases de datos ODBC, PostGIS, así como Shapefiles, siendo este último formato el de salida de resultados.

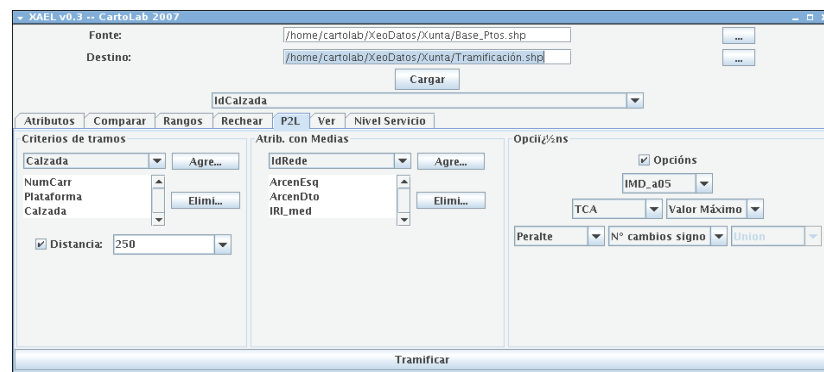



Figura 71. Captura de pantalla de la herramienta de tramificación de XAEL.

Todos los resultados aportados por XAEL se realizan mediante la creación de un nuevo fichero, con lo que además de proteger siempre los datos origen, se permite generar un encadenamiento de procesos, donde resultados de salida de una operación se preparan automáticamente como entrada para realizar otro procesamiento. Algunas de estas funciones son:

- Creación, eliminación y transformación de campos de atributos: Se permite manejar con sencillez la estructura del fichero de salida permitiendo consultar el esquema de datos actual y sus características y modificar qué campos nuevos se han de crear y cuales se han de eliminar.
- Visualización rápida de entidades en modo texto: En ocasiones, es necesario visualizar los contenidos de ciertas entidades para verificar sus valores. Para ese cometido existe una pequeña herramienta que permite acceder a los datos de los registros y sacar sus valores en modo de texto por pantalla. El número de elementos impresos por pantalla es configurable así como qué campos se mostrarán en cada momento.
- Comparación entre atributos numéricos: Ciertos datos guardan una relación entre sí en cada entidad y es necesario comparar esos valores. Esta herramienta realiza dicha comparación permitiendo guardar el resultado en otro atributo. Se puede, de este modo, contrastar los datos de varios campos quedándonos con el mayor, el menor o bien calcular una media de ellos.
- Establecer rangos de datos (filtrado): Se permite definición rangos de valores en ciertos atributos que hacen que los puntos aislados de agrupen de forma lógica favoreciendo la comprensión de la información y facilitando su manejo a todos los niveles. Esta herramienta permite especificar el número de rangos, sus dominios y las etiquetas que darán nombre a cada rango, sin ningún tipo de restricción en solapamiento de dominios, duplicación en



el etiquetado, etc. Tras definir los rangos, se realiza el análisis de la información y se determina la pertenencia o no a un rango para cada elemento poniendo la etiqueta oportuna en el campo indicado por el usuario para tal fin. Dado el acceso secuencial se incluyó un filtro para el tratamiento de este tipo de que actúa controlando las oscilaciones leves de valores en los límites de los dominios de los rangos evitando tramos muy pequeños sin ninguna representatividad.

- Rellenado de valores: Ciertos datos pertenecientes a un tramo de vía se encuentran asociadas a un punto concreto de ésta, como por ejemplo los aforos. Por otro lado, tenemos datos que se aplican en un determinado tramo de la carretera, que se indica expresamente con un punto de inicio y un punto de fin, por ejemplo, el Índice de Regularidad Superficial (IRI). Así, se hace necesario el unir esa información almacenada de modo externo a los puntos de la vía para hacer los análisis.
- Generador de líneas: Se permite construir geometrías lineales a partir de la secuencia de puntos. Así se consigue una enorme reducción de espacio de los datos, siendo mucho más rápido su manejo y tratamiento. Esta herramienta de generación de líneas distingue dos tipos de corte, para considerar no sólo los tramos sino también la carretera a la que pertenecen. De ese modo, el usuario debe definir cuál es el atributo único que identifica una carretera individual y también el/los atributo/s que determine/n las divisiones en tramos dentro de la carretera. Además se puede establecer el corte de tramos indicando el número de vértices máximo, que equivale a identificar una determinada longitud. La herramienta crea un nuevo campo de “número de tramo” que permite identificar el orden de los tramos en dicha carretera.
 - o Otras opciones del generador de líneas: En este paso de puntos a línea se pueden hacer una media de aquellos valores numé-

ricos que se estimen oportunos de los puntos que intervienen en cada tramo. Paralelamente a la transformación de puntos a polilínea se puede generar nueva información que se desprende de los datos. Así, es posible hacer el recuento de ciertas características dentro de cada línea. Por ejemplo se puede contabilizar el número de cambio de valores distintos de un campo alfanumérico, o el cambio de signo de un campo numérico. Además se puede reducir el número de vértices con algoritmos de simplificación o generalización, lo que implica aún más en la mejora de las características de los datos con menor redundancia también a nivel geométrico.

- Cálculo de Niveles de Servicio: se puede calcular los niveles de servicio de las carreteras partiendo de geometrías lineales con los atributos necesarios. El método empleado para ese cálculo es el Manual de Capacidad o HCM (*Highway Capacity Manual*) originario de EE.UU y que es un estándar que se aplica en España y muchos otros países. Con esta herramienta se crean atributos nuevos que albergan los factores generados en el cálculo así como los niveles de servicio, en tiempo siguiendo, por velocidad media, etc.

Aplicando directamente alguna de estas funciones o mediante la combinación de varias, puede generarse una gran cantidad de datos interesantes para el análisis de las características de una infraestructura viaria, que ayuden a resolver problemas que originariamente parecían de enorme complejidad operacional.

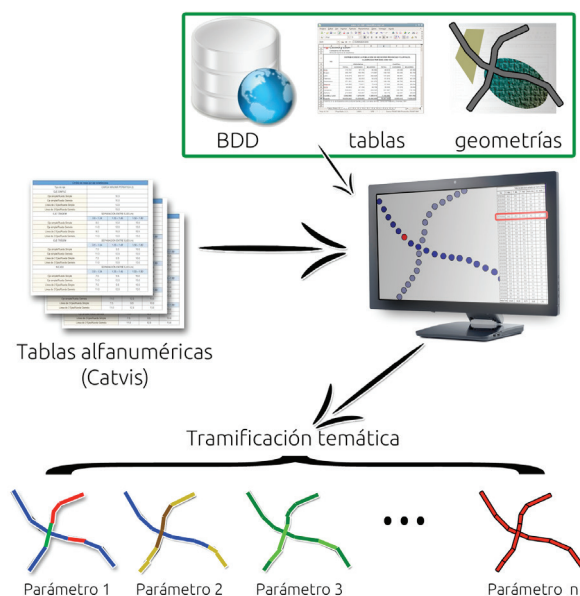


Figura 72. Esquema de funcionamiento del proceso de tramificación lineal de carreteras a partir de la parametrización de una geometría de secuencia de puntos.

Este método de aplicar la geometría de secuencia de puntos al análisis geoespacial de las infraestructuras viarias permite vincular cualquier información técnica, funcional, ambiental o de cualquier otro tipo a cada uno de los puntos concretos en los que se estructura el trazado de una carretera. Para ello podemos operar gracias a un campo común basado en las coordenadas de cada punto, o bien mediante operaciones geoespaciales aprovechando las capacidades de los SIG por la que se puede vincular y relacionar diferentes parámetros geográficos con puntos concretos del trazado viario. Para avanzar en la operatividad de este método se presentan dos aplicaciones concretas del mismo. Una en donde se desarrolla una metodología para obtener la velocidad media de las carreteras en función de sus características geométricas y funcionales. Con el valor de esta velocidad media asignada a cada punto de los trazados viarios (en este caso únicamente para carreteras autonómicas), haremos un análisis de accesibilidad comparando los resultados con usar una velocidad tipo en esos viales. En otro caso, utilizaremos la parametrización mediante geometría de secuencia de pun-

tos para analizar las características técnicas y funcionales del Camino Francés en Galicia, y desarrollar indicadores geoespaciales que evalúen sus tramos.

4.3. Aplicación de la parametrización puntual para el análisis de la velocidad media del viario en los cálculos de accesibilidad

Normalmente los análisis de accesibilidad asignan una velocidad tipo a cada carretera en función de su titularidad y/o de su clasificación jerárquica (Gutiérrez Puebla, 2001; López et al., 2009; Martín, Gutiérrez & Román, 2004). Sin embargo, en las carreteras convencionales las variaciones de velocidad entre unas vías y otras, aun perteneciendo a la misma titularidad o clasificación, son frecuentes e intensas. E incluso dentro de la misma carretera, esta velocidad varía según los tramos de su recorrido. La falta de información detallada sobre las velocidades obliga a tomar esa decisión. Sin embargo, aprovechando las potencialidades del método de parametrización puntual de la información viaria se podría estimar una velocidad media para cada sección de la carretera, y con ella realizar un análisis de accesibilidad considerando las diferencias en los trazados de la red viaria.

En este apartado se recoge en parte algunas de las aplicaciones desarrolladas dentro del proyecto de colaboración entre la Fundación de Ingeniería Civil de Galicia y la empresa BAU Estudio de Arquitectura y Urbanismo SL, denominado “Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica y Elaboración de Análisis Espaciales como Apoyo a la Realización del Plan de Carreteras de Galicia”, en colaboración con las empresas ICEACSA, PROYFE y Oficina de Planeamiento, redactoras de ese Plan aprobado por la Xunta de Galicia en 2008.”.

4.3.1. Cálculo de la velocidad media mediante la parametrización puntual de la información viaria

El Manual de Capacidad propone una serie de cálculos para estimar el nivel de servicio de un tramo de carretera, mediante el cual uno de los pasos implica la obtención del valor de la velocidad media asignado a ese tramo, como vimos en el apartado 3.1.4.1. Todos los valores que intervienen en el proceso de cálculo implican operar con parámetros que consideran características de la sección

transversal de la carretera, de su trazado o de las singularidades del tráfico que soporta. Al poder disponer en SIG de todas estas variables en cada uno de los puntos de una carretera convencional, como vimos en el apartado anterior, es factible conseguir calcular la velocidad media en cada sección viaria como se esquematiza en la Figura 73. Veamos de dónde se obtienen cada uno de los factores considerados.

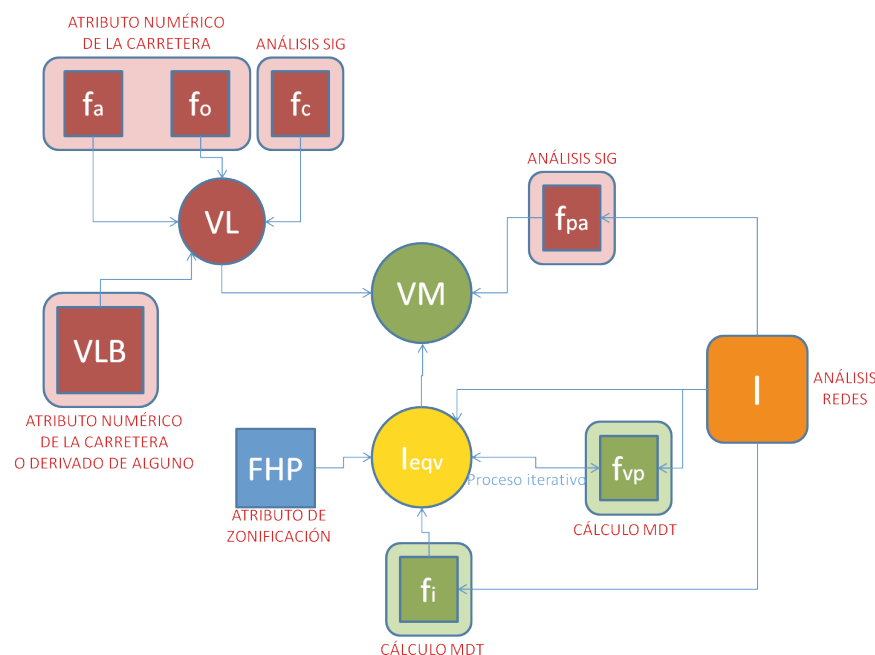


Figura 73. Esquema de las relaciones de cálculo de los parámetros necesarios para obtener la velocidad media VM con la que determinar el nivel de servicio para una carretera convencional, identificando la obtención de cada parámetro mediante procedimientos en el SIG.

Se parte de la velocidad libre básica (VLB) que es aportada en cada carretera como valor de proyecto, o se obtiene con el valor del radio medio de curvatura de los tramos, con el que se calcula la velocidad específica a partir de la relación que se establece en el Plan de Estradas de Galicia de 1991 entre el radio de curvatura y esta velocidad según el tipo de red. Para cada categoría de carretera, según pertenezca a la red primaria básica, primaria complementaria o red se-

cundaria, se asigna una velocidad específica en función de que el terreno sea llano, ondulado, accidentado o muy accidentado. La clasificación del viario está como dato en la base de información, y la consideración del tipo de terreno se realiza mediante la pendiente del terreno calculada en un MDT. La Norma 3.1-IC de trazado, clasifica el terreno en los cuatro tipos indicados en función de si su pendiente es menor del 5%, entre el 5-15%, entre el 15-25%, o mayor del 25%.

Con la VLB se obtiene la velocidad libre (VL) teniendo en cuenta los valores de la sección transversal que se encuentran recogidos en la base de datos como son el ancho de carril (f_a) y el ancho de arcén (f_o). El número de accesos (f_c) que presenta cada tramo, se obtiene por tramificando cada carretera en longitudes de un kilómetro y contando el número de enlaces existentes, valor que se asigna a todos los puntos de ese tramo.

El dato de intensidad de vehículos (IMD) es un dato suministrado en la base de datos por cada tramo de carretera. El tipo de terreno que afecta al factor de trazado (f_i) y al de vehículos pesados (f_{vp}), se asigna según el tipo de terreno clasificado según la pendiente obtenida en un MDT del ámbito. También podría pensarse en utilizar la propia pendiente media del tramo, calculada mediante la tramificación correspondiente de las carreteras.

El porcentaje de prohibición de adelantamiento (f_{pa}) en el tramo requiere de un cálculo más complejo. En primer lugar se analizan los tramos con posibilidad de adelantamiento en cada vía. Los tramos de adelantamiento se determinan por la marca viaria de separación de sentidos de circulación, según esta sea continua o discontinua. Este es un parámetro “por tramos” se identifica en la tabla “Marcas Viales” de CV con los código “M-1.1n”, “M-3.2n”; “M-3.2dn” o “M-2.2n”, según identifiquen línea discontinua, continua-discontinua, discontinua-continua o continua respectivamente. Se ha considerado que no se puede adelantar con línea continua y que se puede adelantar en el resto de los casos. Con ello se calcula la longitud de los tramos de cada carretera en la que está prohibido adelantar y se relaciona con la longitud total de la misma, para obtener el valor de porcentaje de prohibición.

El factor de hora punta (FHP) se obtiene de la consideración de travesía, incluyendo además un análisis previo para identificar las travesías pertenecientes

a núcleos de población de carácter urbano, según su número de habitantes. Este tipo de identificación de los datos, sirve para imponer restricciones en la velocidad media calculada, de forma que esta no supere a la velocidad autorizada en tramos donde ésta sea conocida, como es el caso de las travesías.

En XAEL se dispone de una función en la cual se calcula el nivel de servicio de cada tramo, para lo cual previamente debe calcular la velocidad media en función de los parámetros comentados y de las tablas de relaciones que se establecen en el Manual de Capacidad. Por ello, una vez que se tienen todos los parámetros precisos en los datos de la geometría de sucesión de puntos, el cálculo de la velocidad media para cada uno de ellos es prácticamente inmediato.

Una vez que conocemos la velocidad media para asignar a las carreteras (en este caso para las carreteras autonómicas por ser de las que se dispone información puntual), debemos decidir el método para realizar el cálculo de accesibilidad. Aunque podemos disponer de una información vectorial de los trazados de los tramos de carreteras con el valor de velocidad, aplicando el método comentado en el apartado 4.2, también constatábamos entonces la falta de topología del viario generado. Esta circunstancia imposibilita la aplicación de análisis de redes vectoriales para hacer los cálculos de accesibilidad, a no ser que se invierta un tiempo considerable en ajustar la conectividad de la red. Esta posibilidad se descarta, por lo que se busca opción en los modelos de accesibilidad ráster, en donde el modelo Coste Distancia presenta enormes ventajas como detallamos en el apartado 3.4.1, por lo que escogemos este algoritmo para realizar este ensayo que describiremos a continuación.

4.3.2. Elección del ámbito geográfico de análisis

Por la experiencia acumulada durante el trabajo realizado en los últimos años, y por la cercanía a los datos del territorio gallego, se optó desde el primer momento por utilizar información de Galicia para aplicar en los métodos de cálculo propuestos. La participación en el Plan de Estradas de la provincia de Pontevedra¹¹⁵ de 2009, en donde se obtuvo información viaria de calidad, nos

¹¹⁵ Convenio de 2009 entre la ICEACSA-PROYFE UTE Plan de Estradas y la Fundación de Ingenie-

invita a elegir esta provincia para los ensayos de evaluación de los métodos de cálculo de accesibilidad a realizar durante este proyecto de investigación.

Con la finalidad de conseguir la mejor representatividad posible en los resultados del ensayo, la elección de la zona geográfica para este análisis se establece a partir de un estudio previo sobre la accesibilidad en la provincia de Pontevedra. Así se aplican sobre las ciudades principales de esta provincia (Vigo, Pontevedra y Vilagarcía de Arousa) los algoritmos de Coste Distancia (sin considerar las VAC) y de Coste Distancia Condicional CDC que veremos en el capítulo 5. Como era de esperar, la variación de los resultados de ambos métodos nos refleja como la zona sur está más influenciada por la presencia de una mayor longitud de este tipo de viario especializado (Figura 74). Para fijar la zona de análisis de esta comparativa entre los métodos se recurre al cálculo de zonas de influencia de las tres ciudades, aplicado por el método CDC (Figura 75).

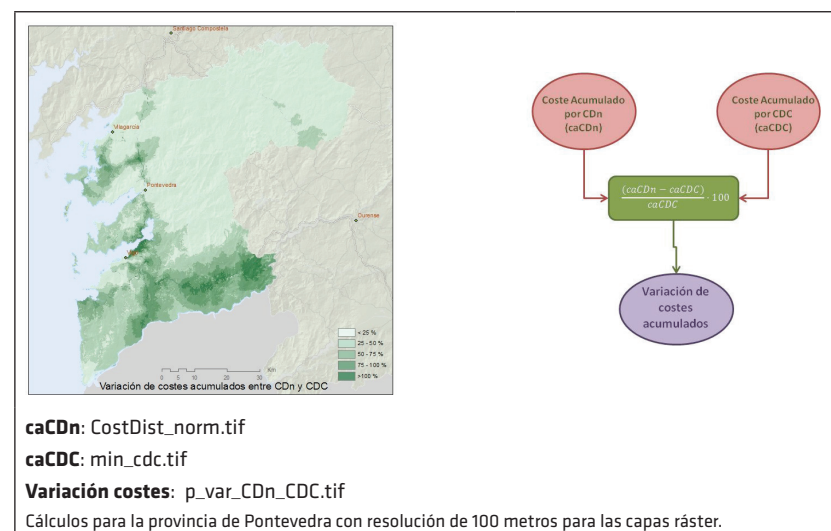


Figura 74. Porcentaje de variación de costes acumulados calculados por el método de Coste Distancia sin tener en consideración las VAC (CDn) y el método de Coste Distancia Condicionado (CDC).

ría Civil de Galicia para el Análisis de funcionalidad y accesibilidad viaria mediante la extracción masiva de datos geoespaciales del catálogo de carreteras de la provincia de Pontevedra.

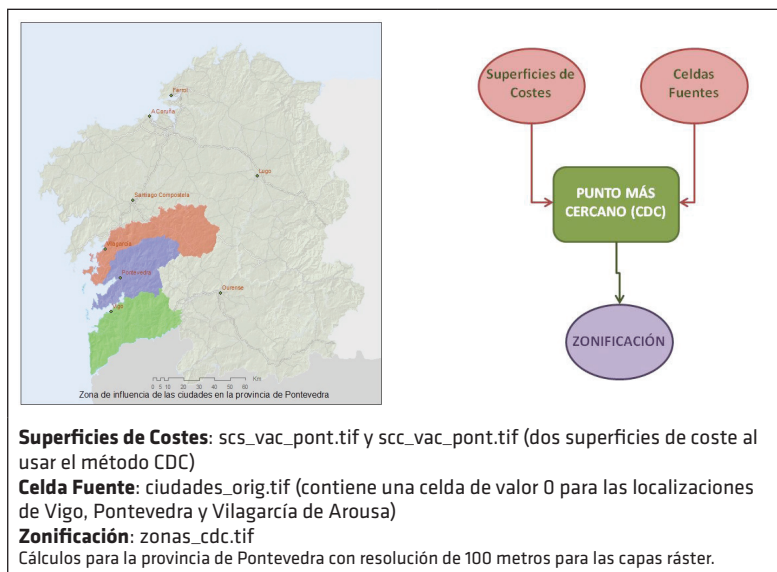


Figura 75. División de la provincia de Pontevedra en las zonas de influencia de las ciudades de Vigo, Pontevedra y Vilagarcía de Arousa, resultantes del análisis de Coste Distancia Condicionado.

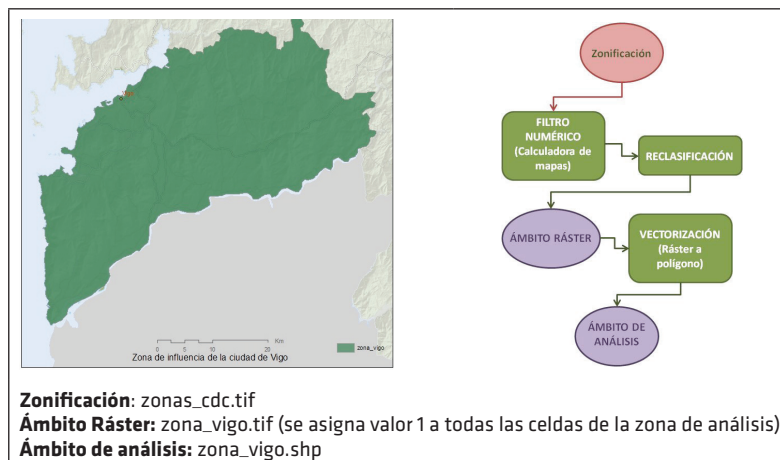


Figura 76. Zona de influencia de la ciudad de Vigo obtenida por el cálculo del punto más cercano aplicando el método de Coste Distancia Condicionado.

Finalmente nos quedamos con la zona de influencia resultante para la ciudad de Vigo (Figura 131), como el ámbito de análisis para la comparación entre los diferentes métodos de cálculo de accesibilidad que se planteen en la investigación. Se trata de una superficie aproximada de 1.560 km² al sur de la provincia de Pontevedra, en la que discurren 221 Km de vías de altas capacidades o de altas prestaciones. Esta elección, no sólo está pensando en este ensayo, sino que también servirá para ensayos que comentaremos más adelante en el capítulo 6.

Los datos de partida utilizados en estos cálculos son similares a los usados en el ensayo, y los describiremos detalladamente en el siguiente apartado.

4.3.3. Datos de entrada para los cálculos de accesibilidad

En esta investigación vamos a ejecutar un cálculo de accesibilidad territorial varias veces sobre el mismo ámbito territorial, con la finalidad de detectar diferencias entre los diferentes métodos considerados. Por este motivo, en caso de que sea necesario usar en varios de los métodos un dato similar, es importante que éste sea el mismo. Evitamos así que se produzcan distorsiones ajenas a los métodos. Por ello describiremos en primer lugar cómo serán esos datos, de qué fuente proceden o cómo se obtuvieron y qué tratamientos previos precisan antes de ser usados en el cálculo de accesibilidad.

Todos las capas empleadas en este ensayo van tener una resolución de 100 metros, que determinará el tamaño de la celda del ráster para definir los elementos territoriales a considerar. Para el área considerada y para el tipo de elementos territoriales a emplear, entendemos que esta resolución presenta un adecuado equilibrio entre la calidad de representación y los tiempos de cálculo necesarios. Aunque es cierto que con ese tamaño de celda se amplía el área de influencia de gran parte del viario, como el objetivo del ensayo no es tener un cálculo de accesibilidad territorial ajustado, sino valorar las diferencias entre los distintos métodos de cálculo, la operatividad que se consigue con esta resolución es adecuada. Además es un tamaño que no distorsiona demasiado la configuración territorial del viario, como podría suceder con tamaños de celda mayores.

Los cálculos basados en el algoritmo de Coste Distancia requieren como mínimo de los siguientes datos de partida:

- Ubicación de los lugares fuente que serán tomados como referencia para el cálculo del coste acumulado.
- Superficie de costes que establece la dificultad de cada celda para ser atravesada, expresada en cualquier variedad de coste que fuese necesario para el estudio (aunque generalmente se considera el tiempo, y este es el que emplearemos en nuestro estudio).

La elección de los lugares fuente dependerá del interés del estudio, y normalmente en este tipo de análisis de accesibilidad, coincidirá con núcleos de población o equipamientos existentes o propuestos en el área territorial considerada. Su obtención es inmediata a partir de la información geográfica de los mismos¹¹⁶.

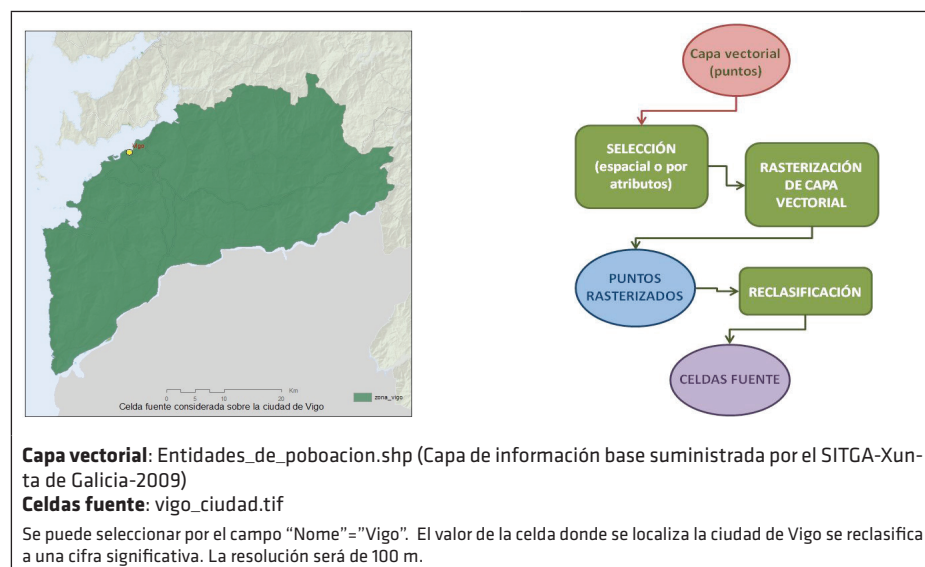


Figura 77. Ubicación sobre la ciudad de Vigo de la celda fuente para los cálculos de accesibilidad.

¹¹⁶ En los ensayos realizados en este proyecto, hemos utilizado la información de las entidades de población de Galicia, elaborada desde el Instituto de Estudios del Territorio de la Consellería de Medio Ambiente, Infraestructuras y Territorio de la Xunta de Galicia.

La celda o las celdas fuente deben ser obligatoriamente las mismas en todos cálculos que se quieran comparar, para que el análisis de los resultados tenga sentido. En este ensayo se toma como celda fuente un punto central de la ciudad de Vigo (Figura 77).

Un caso distinto es la obtención de la superficie de costes, pues deben usarse diferentes datos geográficos, y asociarles un valor en función de que sus características permitan un tránsito más o menos factible por esos lugares. Para la elaboración de esta superficie de costes pueden tenerse en cuenta multitud de factores y elementos territoriales (orografía, vías de comunicación, tipos de terreno, tipos de cultivo, accidentes geográficos, hidrografía, edificaciones, infraestructuras, etc.), y para cada uno de ellos debe considerarse un valor de fricción al desplazamiento según las características del mismo. Este proceso requiere de un cuidadoso estudio para establecer los valores más adecuados al estudio que se pretende realizar. La correcta identificación de la superficie de costes será una clave fundamental para la validez de los resultados obtenidos en los cálculos de accesibilidad.

Dado que el interés de este proyecto no es conocer la realidad de la accesibilidad a determinados lugares en determinados territorios, sino aportar nuevos métodos de cálculo de accesibilidad, y contrastar su validez, únicamente utilizaremos como elementos territoriales para obtener la superficie de costes a la red viaria y a la pendiente del terreno. En los siguientes apartados explicaremos como se tratan estos datos para emplear en los modelos de accesibilidad considerados.

4.3.3.1. Pendientes

Para la obtención de las pendientes del terreno se ha contado con un Modelo Digital del Terreno de Galicia elaborado por el SITGA¹¹⁷ a partir de la topografía

¹¹⁷ SITGA es el Servicio de Información Territorial de Galicia, integrado durante años en la Sociedade para o Desenvolvemento Comarcal de Galicia, y tras la desaparición de este organismo autónomo en 2011, se integró en el Instituto de Estudos do Territorio dependiente de la Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras de la Xunta de Galicia.

de la cartografía básica de Galicia a escala 1/5000, obteniendo una malla con un punto de cota cada 50 metros. Con este MDT, a partir de los geoprocesamientos implementados en el software SEXTANTE, se aplica un procedimiento de cálculo de pendiente máxima en cada punto (Figura 78), en función de las pendientes en las ocho direcciones posibles desde un punto siguiendo el procedimiento descrito por (Travis, Elsner, Iverson, & Johnson, VIEWIT: computation of seen areas, slope, and aspect for land-use planning, 1975). Este método en general sobreestima las pendientes, por lo que para este proyecto su aplicación considera posiblemente pendientes mayores a las reales, lo que permite quedarse del lado de la seguridad al considerar costes mayores en estos desplazamientos.

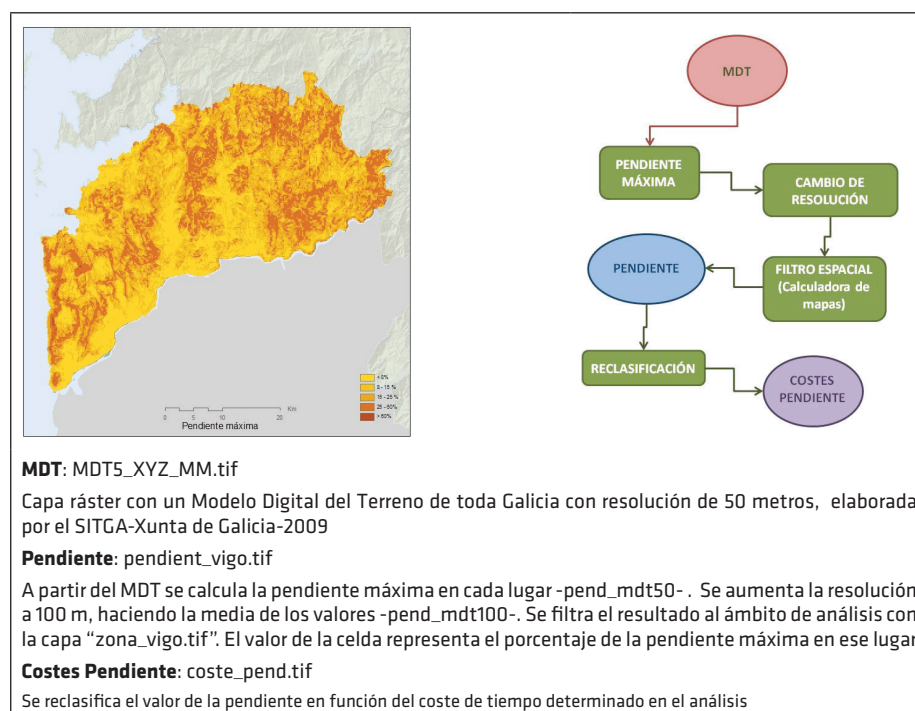


Figura 78. Clasificación del ámbito de análisis en función de la pendiente máxima en cada punto.

El dato de pendiente permite obtener un valor de coste de desplazamiento en cualquier punto del territorio considerado. Como ya comentamos, en esta investigación tomaremos el tiempo como factor de coste principal de los desplazamientos. En este sentido, debemos asignar una velocidad por la que transitar a pie por el territorio en función de la pendiente que este tenga, y a partir de ahí calcular el tiempo que supone atravesar una celda a esa velocidad. Existen muchos estudios que aportan referencias de velocidades a pie según la inclinación del terreno, el tipo de persona, el motivo del viaje, etc. (Colclough & Owens, 2010); (Sun, Walters, Svensson, & Lloyd, 1996); (Finnis & Walton, 2008); (Transport and Road Research Laboratory, 1978); etc.), que nos sirven de ejemplo a considerar.

Es muy usual emplear el algoritmo de Tobler estimado de los datos empíricos elaborados por Imhof en 1950 (Tobler, 1993), que relaciona la pendiente del terreno con la velocidad del movimiento a pie de los humanos, de la siguiente forma:

Ecuación 23

$$W = 6 \cdot e^{-3 \cdot \text{abs}(S+0,05)}$$

W es la velocidad del movimiento a pie representada en km/h; y S es la tangente de la pendiente en radianes. Esta función está pensada para movimientos a pie a través de caminos. Si el desplazamiento se produce fuera de caminos habrá que multiplicar la velocidad resultante por 3/5 (es decir, 0,6). Por otro lado, en un terreno llano (donde la pendiente es nula), la velocidad del movimiento a pie es de unos 5 km/h aproximadamente. La pendiente máxima que se permitiría recorrer según esta fórmula, es mayor de la que comprobaron (Kinsella-Shaw, Shaw, & Turvey, 1992), en un experimento para detectar las dificultades para atravesar una pendiente, donde constataron que la máxima pendiente que cruzó uno de los participantes del estudio fue aproximadamente del 65%.

Dadas las características de este proyecto, por el tamaño amplio del territorio tomado como espacio de análisis, y por el objetivo del estudio fundamen-

tado en la operatividad de los métodos de cálculo de accesibilidad propuestos, a partir de la información anterior, hacemos una estimación propia de las velocidades en función de la pendiente según lo indicado en la (Tabla 9).

Tabla 9. Velocidad (km/h) y tiempo (segundos por metro recorrido) que se asigna al recorrido a pie en función de la pendiente (%) del terreno

%	km/h	seg/m
0 - 8	4,5	0,8
8 - 15	3	1,2
15 - 25	1	3,6
25 - 60	0,5	7,2
>60	0,1	36

Como ya hemos indicado, un objetivo de este trabajo es encontrar modelos de accesibilidad ráster compatibles con el funcionamiento del viario de altas prestaciones, por lo que los criterios de velocidad asignados a los elementos territoriales, siempre que se encuentren en márgenes razonables, no crearán distorsiones en esta búsqueda. Este razonamiento lo hemos aplicado a otros criterios de asignación de valores de velocidad o de costes de fricción durante toda esta investigación.

4.3.3.2. Infraestructuras viarias

Entre las diferentes alternativas existentes para conseguir información de la red viaria en formato vectorial, y tras analizar con detenimiento las características de los trazados aportados por los datos públicos del viario de titularidad estatal, autonómica y provincial, nos decantamos por usar información suministrada por una fuente privada. Concretamente usamos los datos de la red viaria elaborados en 2009 por la empresa NavTeq. La amplia densidad de viales aportados, con más de 29.000 km para toda Galicia, ofrecían un valor de especial importancia para los ensayos a realizar, que las otras fuentes consultadas no llegaban a ofrecer para todo el territorio gallego.

Los datos suministrados se clasificaban en varios archivos ESRI Shapefile, de los que el más indicado para el análisis a realizar es el denominado Streets.shp.

Como la información del mismo no era utilizable directamente para las operaciones de cálculo posteriores, fue preciso realizar algún tratamiento sobre estos datos. El procedimiento se basó principalmente en aportar velocidades a las líneas vectoriales que representaban el trazado de cada viario, clasificados mediante el campo Speed_Cat del shape, según el criterio siguiente (Tabla 10).

Tabla 10. Asignación de velocidades a los trazados según tipología viaria, y el coste de tiempo (en segundos) que supone recorrer 100 metros a esa velocidad.

Speed_Cat	Tipo viario	Velocidad (km/h)	seg/100m
2	Viario de Alta Capacidad (VAC)	110	3,3
3	Viario estatal	60	6,0
4	Viario autonómico	50	7,2
5	Viario provincial	40	9,0
6	Viario local	30	12,0
7	Calles	20	18,0
8	Accesos	10	36,0

Debe considerarse nuevamente que los objetivos fundamentales de este estudio son valorar los métodos de cálculo de accesibilidad, no obtener la accesibilidad precisa de un territorio, por lo que estas velocidades medias asignadas a este ensayo, no se ajustan a un análisis preciso y riguroso de las mismas. De todas formas, se utilizan cifras compatibles con las velocidades medias reales que se tienen en estos tipos de viario. Para este ensayo además se tendrán en cuenta también las velocidades medias por tramo calculadas mediante el método de parametrización puntual de la información viaria. Con ello se intentará comprobar la influencia de considerar velocidades medias por tramo para cada carretera en lugar de asignar velocidades medias por categoría o titularidad viaria.

Los trazados de esta red viaria se rasterizan posteriormente, asignando a cada celda el valor del tiempo que supone recorrer una determinada distancia en función de la velocidad dada. Este dato se utiliza, junto con las pendientes, como parte de la superficie de costes en los modelos de accesibilidad emplea-

dos. En este ensayo, el tamaño de celda es de 100 metros, con lo que esa será la distancia a considerar para calcular el coste de tiempo que supone atravesar cada celda con la velocidad designada en cada lugar (Figura 79).

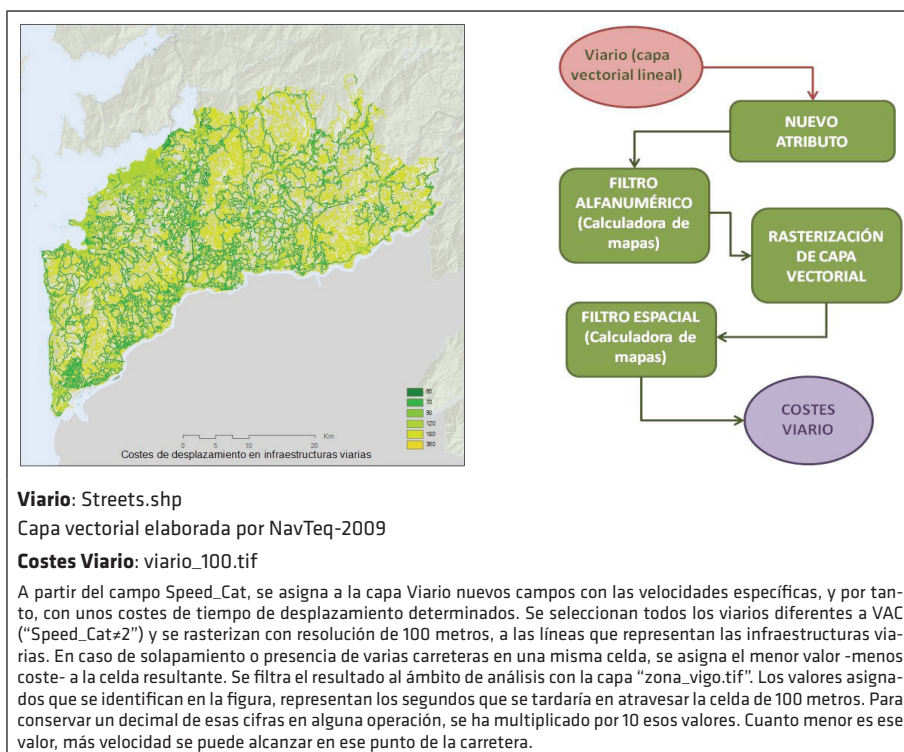


Figura 79. Costes de desplazamiento para las infraestructuras viarias.

La Superficie de Costes para el cálculo de accesibilidad en este ensayo se obtiene a partir de la determinación del coste de atravesar andando el territorio según la pendiente máxima de cada lugar (Figura 78), y de recorrer en coche las infraestructuras viarias existentes (Figura 79). La combinación de ambos costes asigna a cada celda el valor que permite atravesar ese lugar en el menor tiempo posible (Figura 80 y Figura 81). Como en este ensayo el tamaño de celda es de 100 metros, se calcula el tiempo en segundos que supone atravesar esos 100 metros para la velocidad asignada en cada celda (Tabla 11).

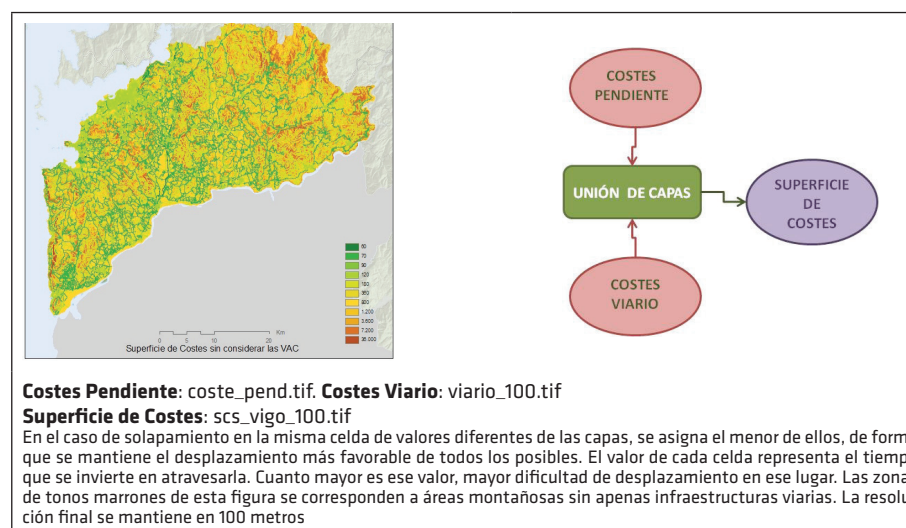


Figura 80. Superficie de Costes a partir del valor de la pendiente del terreno y del tipo de viario existente en cada lugar.

Tabla 11. Tiempos asignados en segundos como coste para recorrer distancias de 100 metros, en función de la velocidad asignada.¹¹⁸

Velocidad (km/h)	seg/100m
110	3,3
60	6,0
50	7,2
40	9,0
30	12,0
20	18,0
10	36,0
4,5	80,0
3	120,0
1	360,0
0,5	720,0
0,1	3600,0

¹¹⁸ Puesto que algunos de los cálculos en el modelo ráster requieren que el tipo de dato sea un número entero, durante el desarrollo del proceso operativo de los métodos de accesibilidad, se multiplican esos tiempos por 10 para conservar el decimal en las operaciones.

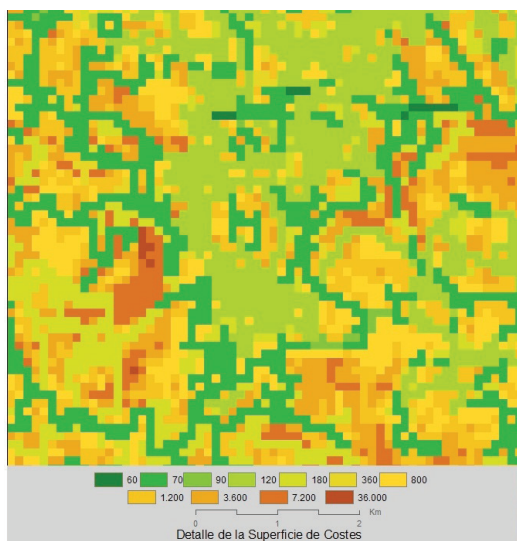


Figura 81. Detalle de la Superficie de Costes resultante de la valoración de los tiempos de desplazamiento en función de la pendiente máxima y del tipo de viario convencional. La resolución de la celda es de 100 metros.

4.3.4. Método de Coste Distancia sin considerar las VAC. Velocidades tipo por viario.

Este es el método normalmente más utilizado en los estudios de accesibilidad a un lugar geográfico mediante SIG ráster. La configuración de los resultados se asemeja al procedimiento de establecer círculos concéntricos de radio variable, y que durante mucho tiempo se ha empleado como método tradicional de mediciones radiales o plantillas circulares para establecer zonas de influencia de un lugar (Lage Reis-Correia, 2010). Sin embargo, al emplear el método de Coste Distancia, los bordes que se obtienen en estos anillos, no mantienen la misma distancia con respecto a la celda fuente, sino que presentan ramificaciones en función de las condiciones de desplazamiento que tengan esos lugares (Figura 82). Al visualizar la red viaria sobre los resultados obtenidos, puede apreciarse como ésta influye en la ramificación de las zonas calculadas. También podemos comprobar en un análisis detallado de la información, cómo el trazado de las

VAC no ha sido considerado, y por lo tanto no afecta en este cálculo (Figura 84). Hemos considerado que incluir las VAC distorsionaría el efecto que las variaciones en las velocidades de la red autonómica podría producir. Además este cálculo sin VAC también nos ayudará a entender la funcionalidad de estas vías en el territorio como veremos en el capítulo 6.

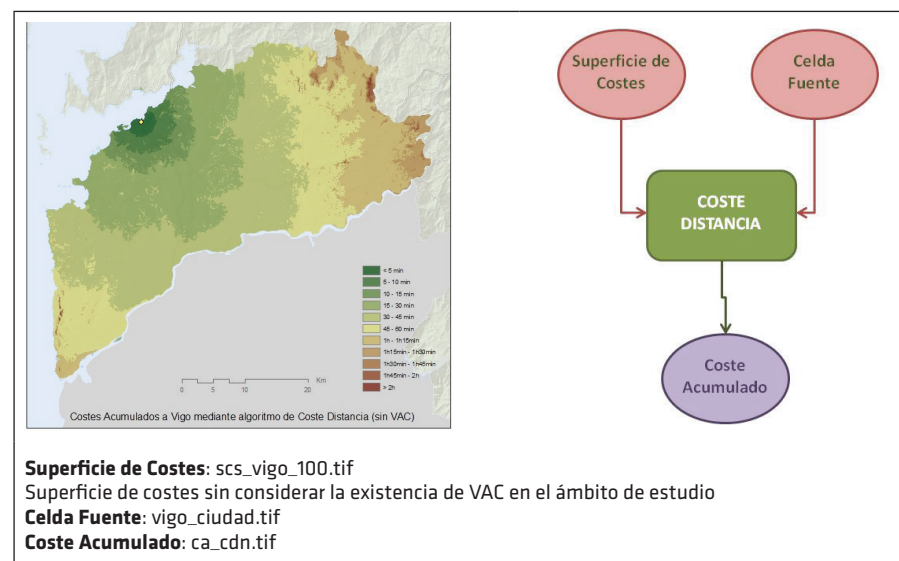


Figura 82. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Coste Distancia sin tener en cuenta el Viario de Alta Capacidad.

Inicialmente se ha optado por clasificar los tiempos obtenidos en los cálculos en franjas de 900 segundos, es decir, 15 minutos. La última franja considera todos aquellos valores superiores a 7.200 segundos, es decir, que representen un tiempo de desplazamiento mayor a las dos horas. De esta manera tendríamos una división en 8 franjas. Sin embargo, con la finalidad de analizar con más detalle la influencia de los diferentes métodos de cálculo de accesibilidad, se considera interesante estudiar con más detenimiento el entorno cercano a las celdas fuentes. Por ello se subdivide la primera franja en tres espacios de 300 segundos (5 minutos). De esta forma, finalmente se agrupan los valores



de los resultados del coste acumulado de los desplazamientos en 11 rangos de tiempo (Figura 83).

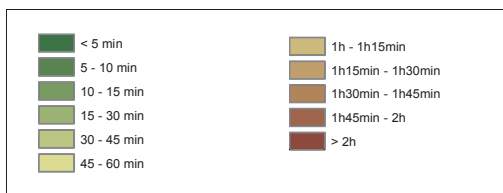


Figura 83. Clasificación por rangos de tiempo de los valores calculados del coste acumulado.

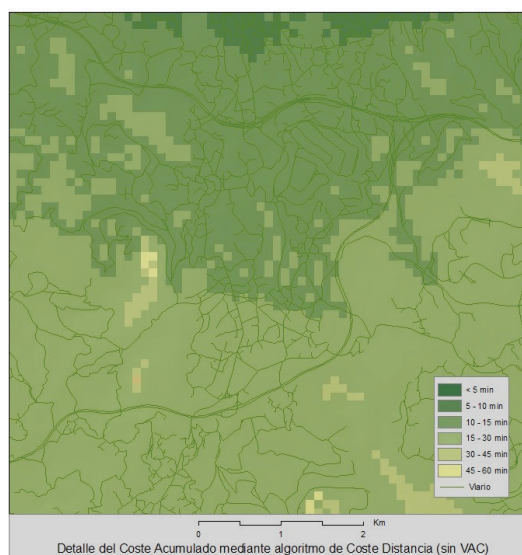


Figura 84. Detalle del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia, sin tener en cuenta las VAC.

Aplicando análisis estadísticos¹¹⁹ sobre los valores obtenidos en la capa ráster resultante (ca_cdn.tif), podemos estudiar el comportamiento de este método

¹¹⁹ Para obtener valores estadísticos representativos se ha decidido analizar los valores en cada una de las zonas de tiempo resultantes, según los rangos establecidos, y también estudiar los valores globales en todo el ámbito de estudio en alguno de los parámetros, como por ejemplo, la media o la desviación típica (STD).

para la obtención de los costes acumulados en los desplazamientos desde la celda fuente escogida (ciudad de Vigo) en el ámbito geográfico fijado (Tabla 12). La distribución de los valores del coste acumulado muestra como las zonas de tiempos medios (entre 900 y 3600 segundos) son las que presentan una mayor concentración de valores en los resultados (Figura 85). El lugar con peor accesibilidad en la zona con respecto a Vigo, presenta un tiempo de desplazamiento de 9.349 segundos. Y el coste acumulado medio para todo el ámbito alcanza los 2.457,7 segundos, con una desviación típica de 1.103,9 segundos.

Tanto en cantidad de superficie del rango de tiempos, como en el valor de coste acumulado, la franja correspondiente a 30-45 minutos, representa el pico de estos parámetros (Figura 86). Desde ese punto, los porcentajes de representatividad de la superficie de las franjas más alejadas descienden rápidamente, mientras los porcentajes de los valores de tiempo acumulado en estas zonas disminuyen de forma más gradual.

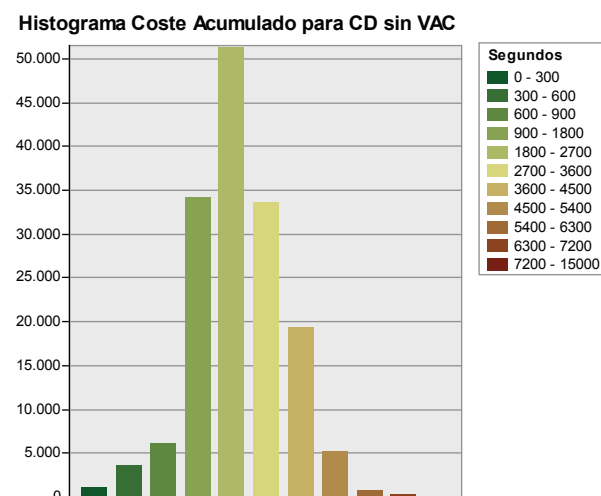


Figura 85. Histograma del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia sin considerar las VAC para el ámbito geográfico de análisis.

Tabla 12. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, sin tener en cuenta las VAC.

CDN	CONTEO	% CONTEO	MIN	MAX	RANGO	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA
< 5 min	1.116	0,72%	0	300	300	194,7	74,2	206	217.319	0,06%
5 - 10 min	3.618	2,32%	301	600	299	472,4	84,1	481	1.709.130	0,45%
10 - 15 min	6.053	3,89%	601	900	299	756,6	87,0	757	4.579.550	1,20%
15 - 30 min	34.166	21,93%	901	1.800	899	1.404,0	254,9	1.431	47.969.700	12,52%
30 - 45 min	51.512	33,06%	1.801	2.700	899	2.240,0	253,5	2.234	115.384.000	30,12%
45 min - 1h	33.654	21,60%	2.701	3.600	899	3.100,7	254,6	3.075	104.351.000	27,24%
1h - 1h 15min	19.337	12,41%	3.601	4.500	899	3.974,7	242,2	3.944	76.858.000	20,06%
1h15min - 1h30min	5.202	3,34%	4.501	5.400	899	4.830,6	233,7	4.784	25.128.500	6,56%
1h30min - 1h45min	797	0,51%	5.401	6.299	898	5.758,1	236,8	5.725	4.589.190	1,20%
1h45min - 2h	267	0,17%	6.305	7.189	884	6.653,6	240,2	6.613	1.776.510	0,46%
> 2h	70	0,04%	7.202	9.349	2.147	7.689,6	526,6	7.471	538.271	0,14%
TOTALES	155.792	100%	0	9.349	9.349	2.457,7	1.103,9	2.355	383.101.170	100%

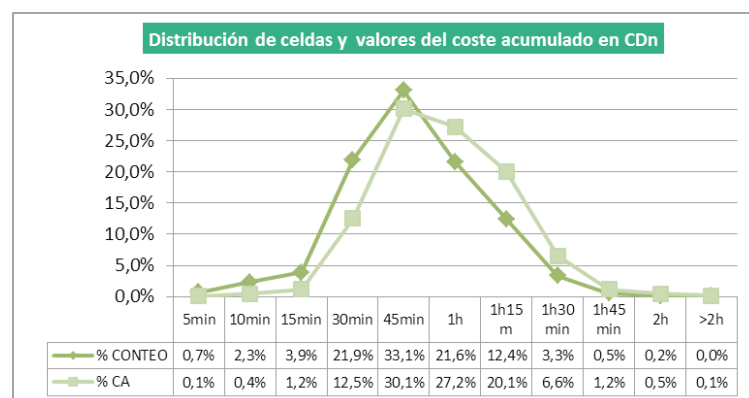


Figura 86. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, sin tener en cuenta las VAC.

4.3.5. Método de Coste Distancia sin considerar las VAC. Velocidades medias por tramo.

Supongamos que sobre el mismo ámbito de la provincia de Pontevedra, hago una variación en la velocidad asignada en ciertos viarios en función de cálculos o estimaciones de la velocidad media según la geometría y características funcionales de la vía, como explicamos en el apartado 4.3.1. Hacemos este cálculo de la velocidad media sobre las carreteras autonómicas existentes en este ámbito. En este caso las variaciones de velocidad para este tipo de viarios van

desde los 24 Km/h, para la situación más desfavorable del trazado, hasta los 91 km/h para el tramo con mejores características viarias. Como comentamos en el apartado anterior, la velocidad tipo asignada a las carreteras autonómicas para el cálculo de accesibilidad anterior fue de 50 km/h. Si consideramos los costes de tiempo asociados a estas velocidades para la resolución de celda del ráster de 100 metros, los 50 km/h suponen un coste de 7,2 seg, que en nuestro análisis hemos multiplicado por 10 para evitar decimales, por lo que tendremos un coste final de 72.

Tras rasterizar los trazados vectoriales de las carreteras y asignarles el coste correspondiente para ambas velocidades, podemos analizar los costes de las celdas que representan los trazados de las carreteras autonómicas (Tabla 13). En el caso de los costes generados por la velocidad media de tramo (VM) tenemos variaciones desde los 150 (para 24 km/h) a 40 (para 91 km/h), sin embargo observamos una media muy aproximada al valor asignado en los cálculos del apartado anterior, con un valor de 70,74. Sin embargo, los valores de coste para los mismos trazados con la velocidad tipo por titularidad (VT), aunque todos deberían ser iguales por considerar únicamente la velocidad de 50 km/h, presentan una variación mucho mayor, desde 360 (para 10 km/h) a 0 por considerar celdas no pertenecientes a los trazados. Ello es debido a que mientras que los trazados de las carreteras autonómicas con la VM, se obtienen por el procedimientos de generación de líneas a partir de la geometría de puntos del Catálogo Visual de Carreteras de la Xunta de Galicia, los datos de carreteras y los trazados considerados en el apartado anterior se basan en los ofertados por la empresa NavTeq. Como se observa, existen diferencias debidas a que en NavTeq parte de los trazados autonómicos se asignan a otro tipo de viario, como puede ser tramos urbanos con velocidades mucho más reducidas. La media del coste en este caso es más alta de la esperada llegando a 81,16, y una desviación mayor que en el caso anterior, cuando debería ser lo contrario.

Esta constatación de las diferencias encontradas nos invita a reflexionar sobre la validez de los datos de partida usados en muchos de los análisis que se realizan, dando por bueno resultados que quizás requerirían un estudio más detallado. Nuevamente la incorporación de los datos sobre un SIG permite unas



medidas de control sobre los datos de gran efectividad, como ya habíamos comentado al valorar los datos procedentes del inventario viario.

Tabla 13. Comparación de costes asignados a los trazados del viario considerando la velocidad tipo (VT) procedente de datos de NavTeq, y a los trazados del viario con velocidad media por tramo (VM) procedentes de la parametrización puntual de los datos del CATVIS.

Viario	Máx	Mín	Media	Std Dev.
VT	360	0	81,16	30,73
VM	150	40	70,74	21,47

En la Figura 87 se representa la ubicación de los trazados de las carreteras autonómicas consideras, diferenciando la variación de los costes entre considerar la velocidad media por tramo (VM) o la velocidad tipo por vial (VT), en cada una de las 5.637 celdas con resolución de 100 m consideradas en este análisis. La variación media en porcentaje es del -10,4%, es decir los costes de VM son menores que los costes por VT, llegando al -84% en algún caso. Pero también se detectan valores donde la variación supone hasta un 114% más de coste para VM con respecto a VT.

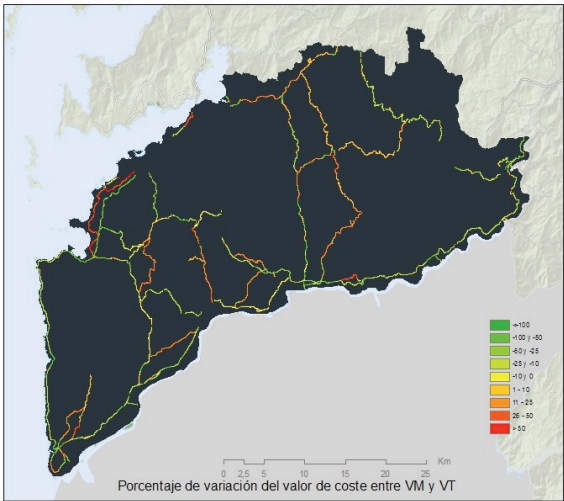


Figura 87. Variación de los costes asignados a los tramos de las carreteras autonómicas del ámbito de análisis, comparando entre los obtenidos por el cálculo de la velocidad media de tramo (VM) y los asignados como velocidad tipo para este viario.

Con estas particularidades se vuelve a calcular el coste distancia a la ciudad de Vigo en el ámbito geográfico considerado, variando únicamente en la superficie de costes, los costes de las celdas de los trazados de las vías autonómicas.

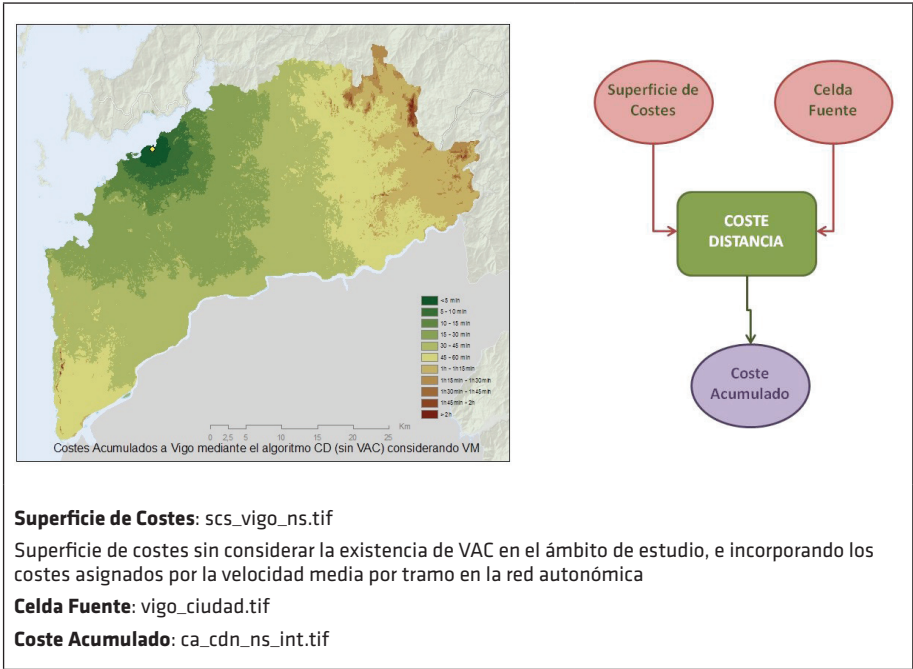


Figura 88. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Coste Distancia sin tener en cuenta el Viario de Alta Capacidad, considerando los costes asignados por la velocidad media por tramo (VM) en la red autonómica.

Aplicando análisis estadísticos¹²⁰ sobre los valores obtenidos en la capa ráster resultante (ca_cdn_ns_int.tif), vemos que el comportamiento general (Tabla

¹²⁰ Para obtener valores estadísticos representativos se ha decidido analizar los valores en cada una de las zonas de tiempo resultantes, según los rangos establecidos, y también estudiar los valores globales en todo el ámbito de estudio en alguno de los parámetros, como por ejemplo, la media o la desviación típica (STD).

14) es muy similar al obtenido en el apartado anterior (Tabla 12). Sin embargo se muestra una reducción cercana al 5% en sus valores de coste acumulado, tanto total, como el valor máximo alcanzado, como la media de todos los costes acumulados. El histograma presenta un aspecto similar (Figura 89), al igual que la Figura 90, aunque aquí apreciamos como las franjas de tiempos superiores a la hora sufren un ligero descenso en sus porcentajes.

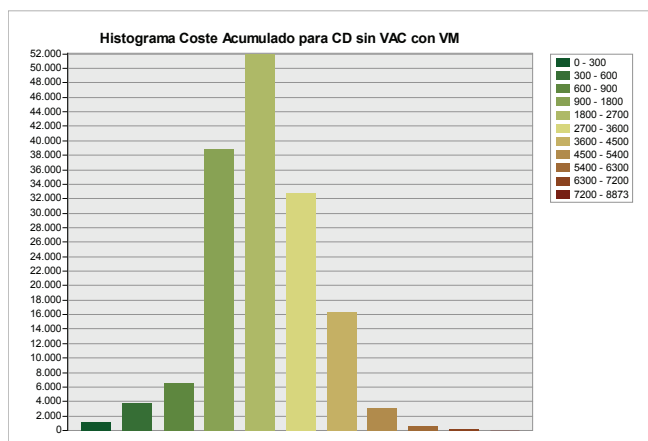


Figura 89. Histograma del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia sin considerar las VAC para el ámbito geográfico de análisis, y teniendo en cuenta la VM en la red autonómica.

Tabla 14. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, sin tener en cuenta las VAC, y considerando la VM en la red autonómica.

CDN_VM	CONTEO	% CONTEO	MIN	MAX	RANGO	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA
< 5 min	1.192	0,77%	0	300	300	193,5	74,2	204	230.661	0,06%
5 - 10 min	3.772	2,42%	301	600	299	472,6	84,0	483	1.782.700	0,49%
10 - 15 min	6.537	4,20%	601	900	299	758,3	86,6	760	4.956.840	1,36%
15 - 30 min	38.891	24,96%	901	1.800	899	1.402,7	256,7	1.429	54.551.300	14,99%
30 - 45 min	52.086	33,43%	1.801	2.700	899	2.214,8	256,6	2.200	115.359.000	31,71%
45 min - 1h	32.805	21,06%	2.701	3.600	899	3.089,7	266,2	3.037	101.359.000	27,86%
1h - 1h 15min	16.456	10,56%	3.601	4.500	899	3.935,0	238,6	3.890	64.754.600	17,80%
1h15min - 1h30min	3.131	2,01%	4.501	5.400	899	4.843,6	237,0	4.803	15.165.200	4,17%
1h30min - 1h45min	629	0,40%	5.401	6.297	896	5.770,3	249,3	5.740	3.629.530	1,00%
1h45min - 2h	235	0,15%	6.301	7.199	898	6.671,4	249,1	6.665	1.567.780	0,43%
> 2h	58	0,04%	7.205	8.873	1.668	7.646,8	397,7	7.506	443.514	0,12%
TOTALES	155.792	100%	0	8.873	8.873	2.335,2	1.053,6	2.226	363.800.125	100%

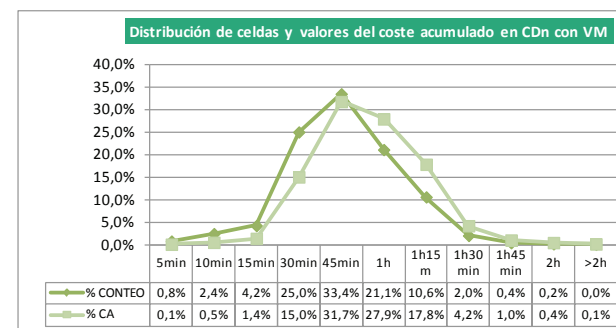


Figura 90. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, sin tener en cuenta las VAC, y considerando la VM en la red autonómica.

Aunque estos trazados sólo representan un 3,6% del ámbito de análisis, y apenas un 6% de las celdas consideradas como viario en ese territorio de estudio, las variaciones en los cálculos de accesibilidad son importantes. Lo podemos comprobar calculando la diferencia entre los valores obtenidos en los costes acumulados del apartado anterior y los obtenidos al considerar la VM en la red autonómica (Figura 91), y los porcentajes que representan (Figura 92).

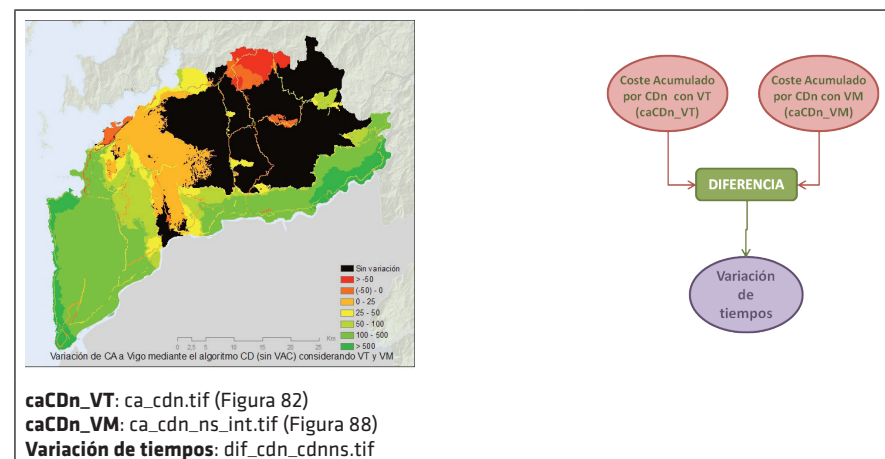


Figura 91. Variación en el coste acumulado calculado con VT y con VM. Los colores verdes representan costes acumulados menores con VM, y los rojos al contrario. La zona en negro representa las celdas donde la variación, si existe, representa un porcentaje tan pequeño respecto al valor total, que se puede considerar nula. Se mantienen los trazados autonómicos para comprender los resultados.

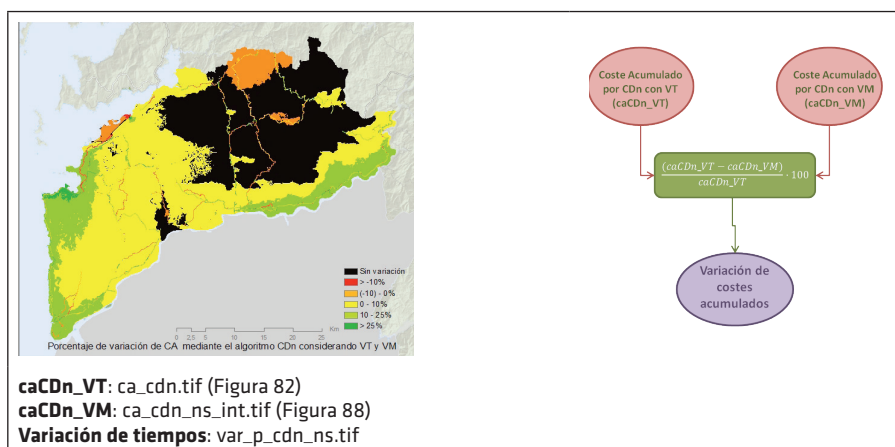


Figura 92. Porcentaje de la variación en el coste acumulado calculado con VT y con VM. Los colores verdes representan costes acumulados menores con VM, y los anaranjados al contrario. La zona en negro representa las celdas donde la variación, si existe, representa un porcentaje tan pequeño respecto al valor total, que se puede considerar nula. Se mantienen los trazados autonómicos para comprender los resultados.

El coste acumulado es claramente mayor considerando VT frente a considerar VM. De hecho cuando la variación es al revés, los porcentajes de variación o el área afectada son muy pequeños (Tabla 15). 54.776 celdas no cambian de valor, lo que representa el 35,2% del ámbito de análisis. Por lo tanto, casi un 65% de las celdas varían su coste acumulado. Prácticamente un 50% tiene una variación hasta el 10% en valor absoluto, y un 15% superior a ese porcentaje, con una variación media en este caso del 15,6%. La variación global representa el 4,4%, si bien se llega a valores del 100% en algún caso. Un 14,65% de las celdas presentan una variación de coste acumulado entre el 10% y 25%, con una media en ese intervalo de 15,2%, lo cual son valores muy significativos para el cambio de costes comentado en sólo el 3,6% de las celdas de la superficie considerada.

Tabla 15. Análisis estadístico del porcentaje de variación del coste acumulado calculado teniendo en cuenta una velocidad tipo (VT) para la red autonómica o su velocidad media calculada por tramo (VM).

p_CDn-CDnVM	CONTEO	%AREA	MIN	MAX	MEDIA	STD	MEDIANA
<-10%	58	0,04%	-141,0	-10,0	-30,2	28,5	-18
(-10%) - 0%	61831	39,69%	-9,0	0,0	-0,2	0,6	0
0 - 10%	70294	45,12%	1,0	10,0	4,6	2,9	5
10 - 25%	22827	14,65%	11,0	25,0	15,2	3,5	14
> 25%	781	0,50%	26,0	100,0	27,5	3,5	27
TOTALES	155.791	100%	-141,0	100,0	4,4	5,9	1

Analizando como varían estos costes en función de cómo nos alejamos de los trazados de las carreteras autonómicas, vemos como más del 80% de las celdas del ámbito considerado están a menos de 3 km de alguno de estos viales (Figura 93).

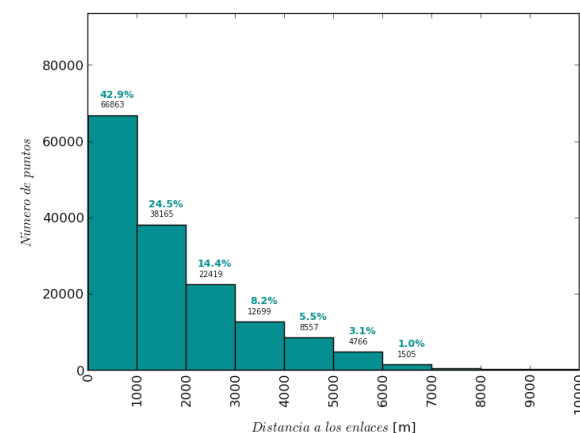


Figura 93. Número y porcentaje de celdas en función de su distancia a una carretera autonómica.

Entre el kilómetro 2 y 3 se aprecia una irregularidad en estas variaciones de costes con respecto a la distribución que sigue el porcentaje de variación (Figura 94), y que no tiene reflejo sin embargo en la distribución de la variación de tiempos (Figura 95). Estas figuras nos sirven para constatar la pequeña participación de celdas con más coste acumulado mediante el cálculo consi-

derando VM, pues los valores negativos de las gráficas son mucho menores a los valores positivos. En las variaciones de tiempos, se muestra como se llegan a cambios de más de diez minutos (600 seg) en muchos casos.

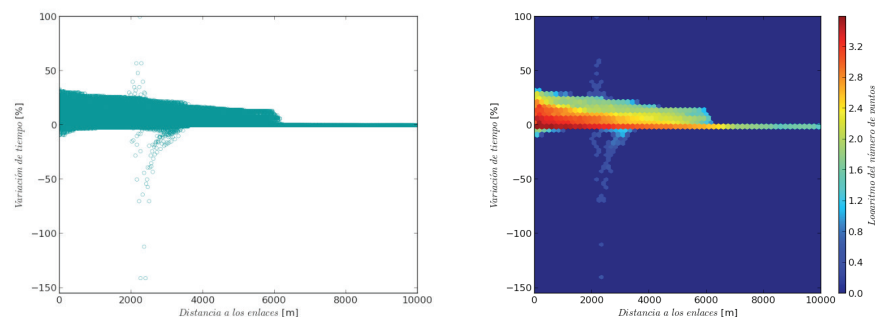


Figura 94. Distribución del porcentaje de variación de costes acumulados en cada celda del ámbito, en función de la distancia a una carretera autonómica. En la figura de la derecha diferenciamos por colores la acumulación de celdas con el mismo valor.

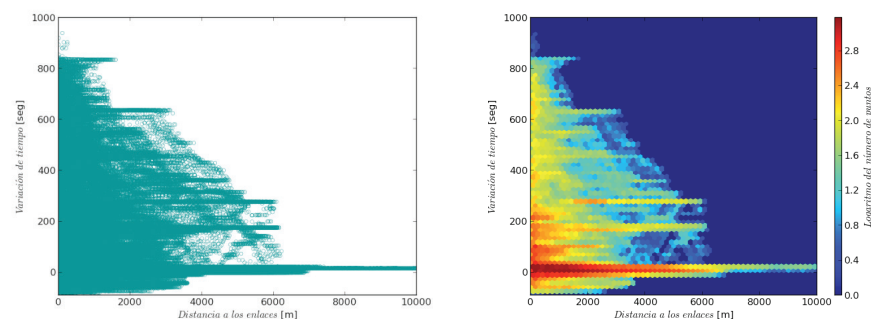


Figura 95. Distribución de la variación del coste acumulado en cada celda del ámbito, en función de la distancia a una carretera autonómica. En la figura de la derecha diferenciamos por colores la acumulación de celdas con el mismo valor.

4.3.6. Conclusiones sobre la parametrización puntual para el análisis de la velocidad media del viario en los cálculos de accesibilidad.

Los resultados obtenidos en este análisis confirman la validez del método de parametrización puntual mediante geometría de secuencia de puntos, para tratar y analizar las características técnicas y funcionales de una red de infraestructuras viarias. Se muestra su versatilidad para manejar cualquier tipo de dato medido sobre las secciones de las carreteras, y operar sobre ellos para obtener nueva información aplicando procedimientos contrastados (como los descritos en el Manual de Capacidad), o mediante nuevos planteamientos de análisis de la información (como veremos en el apartado 4.4). En este caso se consigue obtener la velocidad media de los tramos de las carreteras autonómicas a partir de información disponible en el Catálogo Visual de Carreteras (CATVIS).

La parametrización puntual mediante geometría de secuencia de puntos también presenta ventajas para incorporar de forma rápida, sencilla y efectiva, la información de las carreteras sobre entidades dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG), tanto en formato vectorial como en formato ráster. En este último caso, la aplicación de la información viaria es fácilmente aplicable sobre el algoritmo Coste Distancia para el cálculo de accesibilidad. La posibilidad de utilizar una velocidad media en los tramos de carreteras, en lugar de emplear una velocidad tipo para toda la red viaria de una titularidad, se muestra como un método más realista para operar con esta información en los cálculos de accesibilidad. Pese a usar este cambio de velocidades sólo en la red viaria autonómica, que apenas representa un 6% de toda la red considerada, se obtienen variaciones muy importantes en los costes acumulados calculados de amplias zonas del ámbito de estudio. Por ello se considera de interés ampliar este método para el resto del viario y obtener resultados de accesibilidad más reales.

4.4. Aplicación de indicadores geospaciales de carácter puntual para el análisis técnico y funcional del Camino Francés en Galicia

Aplicando la metodología de parametrización mediante geometrías de secuencias de puntos equiespaciados para caracterizar una infraestructura viaria, es posible analizar el trazado de cualquier tipo de infraestructura lineal. Presentaremos en este apartado un análisis de los trazados del Camino Francés en Galicia, abordado dentro de los trabajos para una nueva delimitación de este itinerario impulsada desde la Xunta de Galicia. En este caso, además de almacenar la información del camino parametrizando sus características en una geometría de secuencia de puntos, aprovecharemos esta metodología para definir nuevos indicadores que evalúen cada uno de los tramos de este viario singular.



Figura 96. “Carte des Chemins de S.Jaques de Compostelle”, 1648. Archivo del Reino de Galicia, Colección Martínez Barbeito.¹²¹

¹²¹ En cierta medida este mapa del siglo XVII refleja lo que se pretende con esta metodología,

El Camino de Santiago es un elemento histórico de enorme relevancia para los territorios europeos por los que atraviesa, especialmente en la franja norte de la península ibérica y en sus etapas finales por tierras gallegas. A diferencia de otros elementos patrimoniales, su uso como vía de comunicación se mantiene hoy en día, siendo por tanto necesario aproximarse a él desde una doble perspectiva: histórica y funcional (Varela García, Martínez Crespo, Ocampo Couto, Jiménez Bernal, & Varela García, 2010). Desde el punto de vista funcional el camino sigue vivo. En el año 2008 según estadística del archivo de la Catedral de Santiago de Compostela se registraron 125.133 peregrinos. Esta presión sobre la ruta requiere un especial esfuerzo de adecuación de la misma para asegurar un buen viaje, en donde el camino debe ser entendido como un elemento singular en el paisaje. Sin embargo, a pesar de la numerosa bibliografía existente sobre el Camino de Santiago, se observan lagunas en el estudio de su morfología, señaladas por algunos autores como lo que “*podríamos llamar visión descaminada [...] enfoque consistente en ocuparse del Camino de Santiago sin prestar atención alguna al camino propiamente dicho*” (Soria y Puig, 1993).

4.4.1. Antecedentes

En 1992, la Xunta de Galicia, en el ejercicio de sus competencias en materia de protección del patrimonio, delimita el trazado del Camino Francés en Galicia, que no coincide estrictamente con el señalado previamente por expertos como Valiña, y en 1993 la UNESCO inscribe al Camino Francés en la lista de Patrimonio Mundial, con un trazado que también presenta variaciones respecto a los anteriores. En vista de estas discrepancias, en 1996 se aprueba la ley de Protección de los Caminos de Santiago, que cataloga al Camino Francés en Galicia como un territorio histórico, extendiendo así la idea de camino al paisaje que lo conforma, y disponiendo que la delimitación de 1992 sea provisional, debiendo efectuarse una nueva. Más de dos décadas más tarde, en 2010 el gobierno gallego resuelve la nueva delimitación del Camino

que no es otra cosa que darle importancia a los elementos singulares del camino, en lugar de al camino en su conjunto. El mapa muestra claramente diferenciados e identificados una serie de puntos que evocan lugares importantes en el recorrido de los trazados hacia Santiago.

Francés, resultado del proyecto iniciado en 2007: *Estudio del Territorio Histórico vinculado al Camino Francés* (en adelante, ETH) (Varela García, Martínez Crespo, & Jiménez Bernal, 2011). Este proyecto fue adjudicado por la Dirección Xeral de Patrimonio de la Consellería de Cultura, a la UTE BAU – SIGNO, que contrató los servicios de Cartolab, entre otras cosas, para realizar la caracterización de los trazados del Camino. Posteriormente, en 2008 las mismas empresas fueron adjudicatarias del camino de la Vía de la Plata, nuevamente contaron con el apoyo del Cartolab. Gracias a esta colaboración hemos podido implementar el método de extracción y aprovechamiento de la información geográfica puntual de una infraestructura viaria tan singular como es el Camino de Santiago.



Figura 97. Municipios y parroquias dentro del ámbito del ETH.

Esta memoria únicamente se centrará en la metodología de caracterización de los trazados del Camino Francés mediante la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y no entraremos en otros objetivos del ETH para delimitar con la mayor rigurosidad y precisión los trazados históricos del camino francés en territorio gallego, y establecer las zonas de protección correspondientes, recopilándose para ello un amplísimo volumen de información histórica, cartográfica, fisiográfica, geológica, hidrográfica, de usos

del suelo, de asentamientos, de redes de comunicaciones e infraestructuras, del parcelario, de espacios públicos, de equipamientos, de toponimia y microtoponimia, del patrimonio natural y cultural, arqueológico, artístico, etc. (Varela García, Borobio Sanchiz, Martínez Crespo, & Ocampo Souto, 2010).

4.4.2. Objetivos del análisis de caracterización del trazado del camino

El presente análisis parte de la información de los trazados del camino realizados en el ETH, para lo que se fijan los siguientes objetivos:

- Identificar sobre la cartografía actual los diferentes trazados oficiales y sus delimitaciones, así como los trazados históricos verificados por el equipo de información histórica durante los trabajos de documentación y campañas de campo.
- Caracterizar técnica y funcionalmente los distintos trazados identificados
- Realizar una tramificación temática de los trazados según sus características
- Elaborar unos indicadores del camino para identificar con mayor facilidad y de forma sintética, tramos con problemáticas concretas.

El elevado volumen de información recogido en los vaciados documentales y en los trabajos de campo hace necesario contar con instrumentos que sintetizen la información y la presenten de una forma ordenada y clara. Además, la existencia de múltiples trazados y variantes para el Camino Francés en Galicia precisan de métodos de análisis globales y sintéticos, que permitan la comparación entre ellos de manera objetiva. Para ello se diseñó una metodología de caracterización técnica e histórica de un camino singular con elevado valor cultural o patrimonial, basada en la identificación de parámetros geoespaciales de carácter puntual.

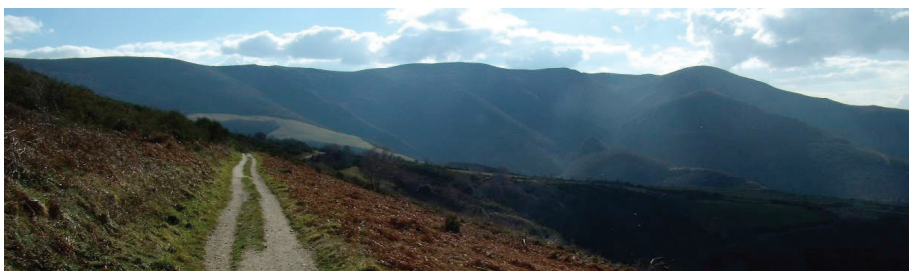


Figura 98. Paisaje en torno al camino en los montes de la parroquia de Vilavella. Triacastela

4.4.3. Metodología para el estudio técnico y funcional del camino

Como elemento central del estudio, los trazados jacobeos fueron objeto de un análisis completo y preciso, con el objetivo de conocer al detalle las características del camino que afectan directamente a su función, a su historia y a su identidad como ruta de peregrinación. Para dar cumplimiento a ese objetivo se llevó a cabo la **caracterización técnica y funcional de los distintos trazados identificados**, el análisis de la información recogida para la tramificación temática de los mismos y la elaboración de unos indicadores de seguridad y de calidad del camino. Esta metodología permite contar con un exhaustivo estudio de las características de cada uno de los trazados del Camino, identificando claramente sobre cartografía actual el recorrido de los mismos, y valorando su estado actual y su integración con su ámbito territorial.

El procedimiento planteado se divide en dos tipos de análisis. Por un lado, la operativa para conseguir caracterizar los parámetros técnicos de todos los tramos del camino, y manejar de forma eficiente la gran cantidad de datos que representan. Y por otro lado, elaborar unos indicadores que sintetizen toda la información obtenida sobre los trazados del Camino Francés.

4.4.3.1. Caracterización técnica mediante información geográfica puntual

La metodología empleada para la caracterización técnica del camino comprende varias líneas de trabajo. En primer lugar se comenzó por la búsqueda y recopilación de toda la documentación gráfica y cartográfica de carácter his-

tórico de los trazados de Camino, así como el análisis de la amplia bibliografía existente, apoyando al equipo de información histórica. En este proceso se estudian las variaciones existentes en el trazado del Camino, la evolución sufrida en las diferentes épocas con una justificación documental de estos cambios, intentando identificar y cartografiar, si es posible, por donde irían los tramos alterados. Como resultado de este estudio, los trazados identificados se clasificaron en las siguientes categorías, representando cada uno de ellos sobre una cartografía oficial:

- Camino Jacobeo, correspondiente a la ruta señalada por la “S.A. de Xestión do Plan Xacobeo”, dependiente de la en su momento Consellería de Innovación e Industria a través de la Dirección Xeral de Turismo y de la Subdirección General de Fomento. Esta ruta es la indicada mayoritariamente al peregrino con flechas y señales.
- Camino Oficial del 1992, correspondiente a la delimitación recogida en la resolución de fecha 12 de noviembre de 1992 de la Dirección General de Patrimonio Histórico y Monumental.
- Camino UNESCO, correspondiente a la delimitación incluida en la Documentación Técnica para la Declaración del Camino de Santiago como Patrimonio de la Humanidad en 1993.
- Camino Histórico. En esta categoría se engloban todos aquellos caminos identificados en el presente trabajo por los correspondientes equipos de investigación que cuenten con un cierto grado de certidumbre y que no correspondan a ninguna de las categorías anteriormente citadas.
- Camino Tradicional. Viario en el entorno del camino que podría haber sido usado para la peregrinación en algún momento, aunque su funcionalidad de carácter más local. En muchas ocasiones estos tramos se descartan del estudio una vez se comprueba en campo su función.

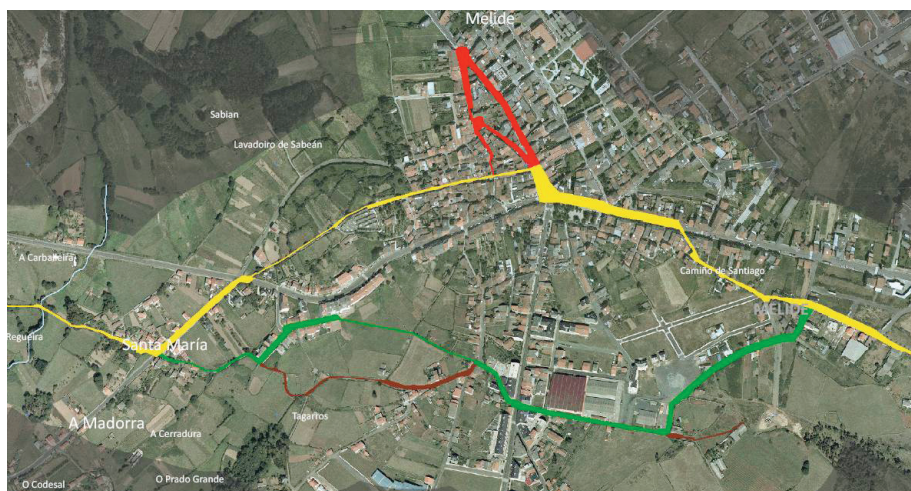


Figura 99. Trazados estudiados en torno a la villa de Melide. En amarillo, trazado jacobeo; en rojo, trazados oficiales; en verde, trazado UNESCO; en marrón, trazado histórico.

Una vez que se disponía de una importante información sobre los trazados, se comenzaron los trabajos de caracterización física, técnica y funcional de las diferentes alternativas identificadas para el Camino Francés. Para ello se recurrió a la consulta a distintas bases de datos existentes sobre estos, y fundamentalmente a un exhaustivo análisis directo, recorriendo cada una de las trazas estudiadas, y recabando sobre ellas todos los aspectos técnicos y funcionales más relevantes del recorrido.

Para efectuar la caracterización del trazado se realizó una campaña de campo con la participación de técnicos especialistas que recorrieron a pie todos los trazados estudiados en el proyecto, apoyados en sistemas GPS, ordenadores portátiles de pequeñas dimensiones, cámara fotográfica con georreferenciación de la imagen, fichas y cartografía específica elaborada a tal efecto con orto-fotografías del PNOA.

En la caracterización de cada punto del camino se realiza un triple levantamiento de información:

- caracterización técnica de ese punto apuntada sobre fichas que posteriormente se digitalizarán
- adquisición de la posición geográfica del punto en coordenadas UTM
- toma de fotografía digital donde sea interesante



Figura 100. Ejemplo de datos obtenidos en un punto concreto del trazado del camino, tanto parámetros técnicos como foto asociada al lugar.

La caracterización técnica implica tomar datos de varios parámetros que definen las características esenciales del vial como son:

- Código del punto, que sirve para identificarlo y enlazarlo con el resto de información correspondiente a ese lugar.
- Material del pavimento. Se distingue entre numerosos tipos, siendo predominantes la tierra, el asfalto y la piedra en villas.
- Estado de conservación de pavimento. Este parámetro está muy relacionado con la seguridad del caminante o del vehículo, y tiene en consideración las diferencias relativas al material del que se trate.
- Ancho del pavimento por el cual circula el peregrino, animal o vehículo.
- Tipo de plataforma: única o compartida. Una plataforma única implica que sólo un modo de uso puede transitar por ella, mientras que compartida supone que varios modos conviven en un mismo espacio de tránsito.

- Tipo de camino. Representa la tipología general de la ruta desde un punto de vista morfológico, en ese punto: camino, senda en bosque, carretera, escalera, puente, calle, plaza, etc.
- Modo de uso: peatonal, bicicleta, caballo, vehículos a motor. Cada punto puede permitir varios modos de uso simultáneamente.
- Límites del camino. Este parámetro está directamente vinculado a la concepción del camino como tal, a su paisaje y a su conservación. Se especifica qué existe en los bordes del camino, y qué elementos marcan la frontera entre el espacio propio de la ruta y el paisaje que la rodea, y que forma parte de su área visible. Entre otros atributos encontramos bosque, muros de finca, setos, vallas, edificios o taludes. Este parámetro es doble, porque se recogen de manera independiente el borde derecho e izquierdo.
- Visibilidad desde el camino a ambos lados. No sólo los bordes son parte del camino, si no también todo es espacio visible desde él. Este parámetro informa si ese punto del camino tiene un área de visibilidad asociada o no.
- Elementos catalogados. Cualquier elemento singular o relacionado con el camino se apunta en el punto más cercano inventariado. Este es el caso de indicadores, señales, fuentes o cruceros o cualquier otro bien catalogado.
- Valoración estética percibida. La compleja singularidad del ambiente creado por el camino no siempre puede ser valorada mecánicamente, por lo cual se creó un parámetro donde los técnicos de campo pudieran calificar la calidad estética del entorno de ese punto en función de la percepción humana.

El procesamiento de toda la información de campo se lleva a cabo usando el SIG, en donde cada punto se georreferencia y codifica, asociándole los diferentes campos de información recogidos en campo. Así mismo se detalla a qué trazado o variante del camino francés pertenece dicho punto. También se establece la unión con al menos una fotografía por cada punto de recogida de datos, en el

caso de que hubiese. En esencia, la caracterización parte de una toma de datos puntual a medida que se recorre un trazado. Tratándose de una infraestructura como el Camino de Santiago, que se desarrolla por diversidad de caminos y plataformas, en diferentes ámbitos geográficos, en el medio rural y en el urbano, los cambios en sus características son constantes. Para agilizar la toma de datos y no tener que parar constantemente, los técnicos sólo apuntan un nuevo punto de control en aquellos lugares donde alguna característica varíe. Fue necesario recorrer 266 kilómetros, adquirir 4.295 puntos de información y tomar 4.523 fotografías a lo largo de los 12 municipios que recorre el camino francés en Galicia: O Cebreiro, Triacastela, Samos, Sarria, Paradelas, Portomarín, Monterroso, Palas de Rei, Melide, Arzúa, O Pino y Santiago de Compostela.



Figura 101. Ejemplo de localización de puntos de toma de datos técnicos en el recorrido sobre el trazado del Camino Francés.

Una vez se dispone de todas las características técnicas del camino para cada municipio, con el apoyo de las capacidades de geoprocesamiento de la información geográfica que tienen los SIG, se generan puntos equidistantes cada 10 metros sobre todos los trazados del camino. Para ello previamente se dis-

pone de una entidad lineal que recorre cada camino, sin dato alguno asociado a ella. Tras generar la sucesión de puntos equidistantes se acoplan los puntos inventariados en el trabajo de campo, de tal forma que sus características son automáticamente implementadas sobre el punto de la sucesión más cercano al de campo.



Figura 102. Proceso de asignación de datos almacenados en los puntos recogidos en campo (color azul), al punto más cercano (color rojo) de los correspondientes al trazado del camino (color amarillo).

El siguiente paso es dotar de caracterización a todos los puntos de la sucesión que se encuentran entre dos puntos de campo. Para estos procesos se hace uso de las herramientas SIG libres, como gvSIG, OpenJUMP o SEXTANTE, así como XAEL, un desarrollo propio para la generación automática de entidades lineales a partir de información puntual secuenciada (Varela García et al., 2008). Se hace un recorrido secuencial por todos los puntos desde un extremo del camino al contrario, de forma que se rellenan todos los puntos sin dato, copiando la información existente en el primer punto con información hasta que se llega a otro punto con datos recopilados. Ese nuevo punto servirá como fuente de información para los siguientes puntos sin dato, hasta volver a llegar a un punto con información almacenada.

El resultado de este proceso es un trazado lineal compuesto por puntos cada 10 metros para todos los tramos de todos los diferentes trazados del camino. Cada punto de la línea contiene información de todos los parámetros recogidos en campo, está correctamente posicionado geográficamente y además

se le dota de un enlace a las fotografías que pueda haber en ese lugar. Esta sucesión de puntos se puede transformar en una línea por medio de XAEL, tramificando el camino en función de cualquier atributo considerado. Es posible pues crear una capa del camino con tramos en función de su material, de su estado de conservación, de su ancho, etc.

Este proceso garantiza una enorme versatilidad para manejar e interpretación los datos tomados en campo. Asimismo, esta metodología de trabajo evita tener que tomar información en más puntos de los necesarios, pues finalmente tan sólo fue apuntado el 16,14% de los 26.607 puntos que constituyen todos los trazados del camino.

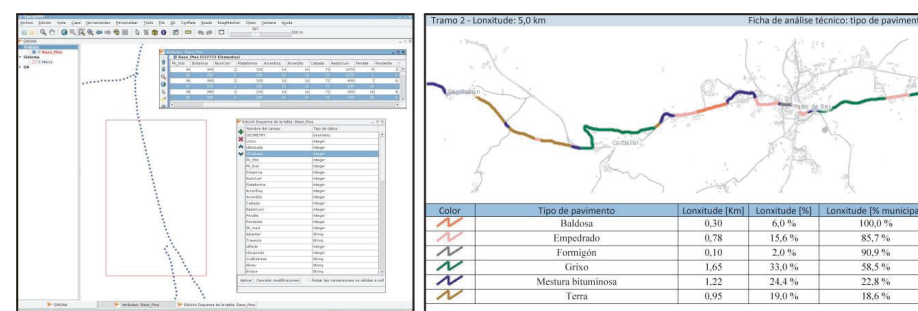


Figura 103. Procesos de generación de puntos y resultado final de tramificación mediante XAEL, del camino según el tipo de pavimento en el entorno de Palas de Rei

4.4.3.2. Indicadores geoespaciales del camino

El trabajo de caracterización del camino se soporta sobre una amplia batería de parámetros que a su vez arroja una gran variedad de información, pero ese planteamiento debe ser compatible con una visión más sintética y clara del camino. Con este objetivo se han generado tres indicadores que permiten entender las relaciones del entorno con el itinerario, evaluar las necesidades de cada lugar y además realizar análisis comparativos. Los indicadores propuestos son:

- Indicador de seguridad vial de los trazados del camino (ISC): expresa el grado de seguridad que garantiza el camino al peatón en relación



a otros medios de transporte o a la conservación del mismo camino.

- Indicador de calidad percibida de los trazados del camino (ICC): combina factores estéticos, paisajísticos y de morfología del camino para expresar el grado de aproximación del trazado a la idea de camino singular.
- Indicador de análisis integrado de los trazados del camino (IAC): combina el ISC y el ICC y ofrece una imagen clara y global del estado y calidad del trazado en cada municipio.

La construcción de estos indicadores se basa en:

- Sencillez de elaboración y de cálculo
- Representación fiel de la situación del camino
- Aplicación extensiva a todo el camino
- Precisión para cada 10 metros de trazado
- Rango limitado a valores de 0 a 10, siendo 0 el peor valor posible y 10 el mejor

La generación de estos indicadores se realizó para cada punto del trazado, usando para ello las características recogidas en campo. Posteriormente con ayuda de XAEL se tramificó cada itinerario en función de rangos preestablecidos.

4.4.3.2.1. Indicador de seguridad vial de los trazados del camino (ISC)

Este indicador mide el riesgo que puede existir sobre el peregrino en un punto del camino, definiendo el concepto de seguridad vial como la cualidad que la senda proporciona para caminar sobre ella. Para su cálculo se usan cuatro indicadores derivados de los datos tomados en campo, asignándole un valor entre 0 y 10 al dato de cada uno de los parámetros del camino analizados:

- Indicador de morfología de camino (IMC), que tiene en cuenta la tipología de plataforma y de camino, así como el ancho o la existencia de cruces con carreteras. Se espera que una plataforma única para el caminante y de ancho suficiente para el paso de al menos dos personas sea altamente segura.

Tabla 16. Valoración de elementos del indicador de morfología (IMC)

Plataforma	Tipo de camino	Ancho	Zona de reserva	Valor
Propia	Camiño			10
Propia	Estrada	< 6m		7
Propia	Estrada	> 6m		0
Propia	Paso inferior			10
Propia	Rúa			9
Compartida	Estrada		no existe	0
Compartida	Estrada		si existe	5
Compartida	Rúa			6

- Indicador de ancho de plataforma (IAP). En cuanto al ancho, una vía de 2,5 metros es idóneo para caminar, ya que permite mantener una distancia con las márgenes, protegiendo de la vegetación de los bordes y ofrece más seguridad en potenciales caídas. Un ancho menor implica menos seguridad, y un ancho mayor favorece que sea compartida por más modos de transporte, permitiendo la entrada en el camino de ganado o de vehículos rodados, que hacen menos seguro el tránsito peonil.

Tabla 17. Valoración de elementos del indicador de ancho de plataforma (IAP)

Ancho (m)	Valor
A<1	1
1≤A<2	7
2≤A≤3	10
3<A≤5	5
5<A<8	1
A≥8	0

- Indicador de estado del pavimento (IEP). El estado de conservación del material de la superficie de la plataforma es un aspecto clave en la seguridad del caminante.

Tabla 18. Valoración de elementos del indicador de estado del pavimento (IEP)

Estado	Valor
BUENO	10
MALO	0
REGULAR	5

- Indicador de regularidad del pavimento (IRP). Un pavimento regular minimiza el riesgo de caídas o lesiones, por lo que el tipo de pavimento aportará un valor de interés en la seguridad del peregrino.

Tabla 19. Valoración de elementos del indicador de regularidad del pavimento (IRP)

Regularidad	Valor
LISO	10
IRREGULAR	5
MUY IRREGULAR	0

Ecuación 24

$$ISC = 0,6 \cdot IMC + 0,1 \cdot IAP + 0,1 \cdot IEP + 0,2 \cdot IRP$$

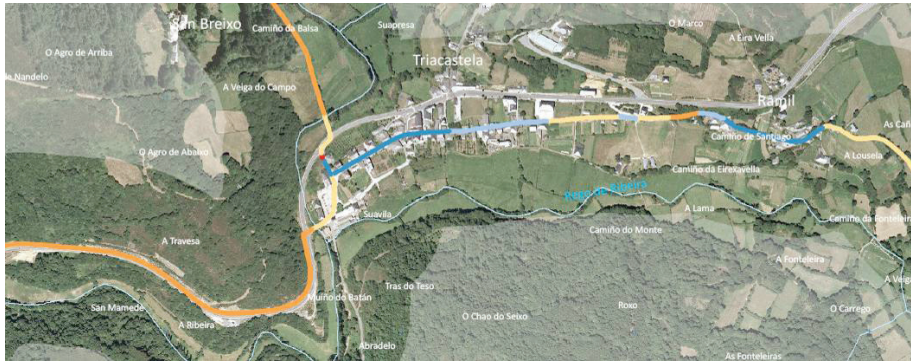


Figura 104. Tramos del camino según el ISC. En tonos anaranjados las zonas de más riesgo y en azul las más seguras. Se aprecia como allí donde la ruta discurre por carretera el riesgo aumenta

4.4.3.2.2. Indicador de calidad percibida de los trazados del camino (ICC)

El concepto de calidad percibida está muy relacionado con el concepto de camino como ruta de carácter natural, histórico, cultural o espiritual. Consideramos la calidad percibida como el conjunto de elementos que caracterizan morfológicamente al Camino de Santiago e intenta plasmarse con un valor numérico la adecuación de ese lugar al ideal de antiguo camino de peregrinación, relacionándolo con la calidad paisajística de su ámbito. Para su cálculo se usan seis indicadores derivados de los datos tomados en campo, a los que previamente se les ha asignado un valor entre 0 y 10 en función de la tipología o característica técnica que presenten:

- Indicador de márgenes (IM). Introduce información de los elementos que marcan el límite espacial del camino en ambas márgenes. Debemos tener en cuenta que este indicador tendrá un valor para el lado derecho y otro para el lado izquierdo, pues se valoran los dos bordes del camino por igual.

Tabla 20. Valoración de elementos del indicador de márgenes, válido tanto para el borde derecho como para el izquierdo (IM)

Elemento de borde	Valor
Finca a nivel	6
Bosque	10
Bordillo	5
Muro de piedra	8
Valla metálica	0
Valla de madera	6
Seto vegetal	7
Muro de hormigón	0
Edificio	2
Quitamiedos	0
Acceso a camino	5
Talud	7
Jardín	6

- Indicador de pavimento (IP). Se considera un valor cualitativo a los materiales del pavimento que mejor se adapten a un camino histórico.

Tabla 21. Valoración de elementos del indicador de regularidad del pavimento (IRP)

Tipo de pavimento	Valor
Tierra	10
Grava	8
Macadam	0
Riego asfáltico	1
Mezcla bituminosa	1
Hormigón	2
Microhormigón	2
Adoquín	7
Empedrado	8
Baldosa	3
Madera	10
Metálico	2

- Indicador de conservación del pavimento (ICP). No sólo el tipo de pavimento contribuye a una mejora de la calidad percibida, sino también un adecuado nivel de conservación del mismo.

Tabla 22. Valoración de elementos del indicador de estado de conservación del pavimento (ICP)

Conservación	Valor
BUENO	10
MALO	0
REGULAR	5

- Indicador de tipo de plataforma (ITP). En la actualidad el Camino Francés en Galicia transita por caminos y carreteras, aunque en la

concepción colectiva de los peregrinos la calidad percibida estará muy relacionada con que el Camino sea un camino y no otra cosa. Precisamente la UNESCO, en el informe previo a la inscripción en la lista de Patrimonio Mundial, valoró de manera esencial la existencia del trazado original de *camino*.

Tabla 23. Valoración de elementos del indicador de tipo de plataforma (ITP)

Tipo de plataforma	Valor
PROPIA	10
COMPARTIDA	5
ELEVADA	6
HUNDIDA	0

- Indicador de visibilidad (IV). Si bien una alta visibilidad del territorio asociado a la ruta contribuye en general a una mejor calidad percibida de la ruta, este aspecto tiene un peso bajo en el global del indicador, puesto que zonas de muy baja visibilidad también pueden ser cualitativamente muy apreciadas. Por ejemplo, calles en centros históricos.

Tabla 24. Valoración de elementos del indicador de visibilidad (IV)

Visibilidad	Valor
AMBOS LADOS	10
SÓLO LADO DEREITO	5
SÓLO LADO ESQUERDO	5
SIN VISIBILIDAD	0

- Indicador de valoración técnica (IVT). Representa la percepción humana en la calidad percibida, y es otorgado por los técnicos de campo en función del ambiente específico de cada lugar recorrido. El trabajo en campo demuestra que tramos del Camino que presentan idénticas características morfológicas y estructurales producen en el caminante sensaciones opuestas. Para superar esta distorsión se han fijado unos

criterios que permitan a un técnico valorar la calidad del paisaje inmediato que le rodea, como son la armonía visual del entorno inmediato, volúmenes adecuados en los elementos y equilibrio de formas; la visión evocadora de camino histórico o antiguo; la calidad, conservación del paisaje y potencia visual de las formas; la existencia de elementos de valor monumental o histórico; los materiales, texturas y gamas cromáticas armónicas y cercanas al concepto de camino tradicional.

Ecuación 25

$$ICC = 0,6 \cdot [0,2 \cdot IMI + 0,2 \cdot IMd + 0,3 \cdot IP + 0,1 \cdot ICP + 0,1 \cdot ITP + 0,1 \cdot IV] + 0,4 \cdot IVT$$

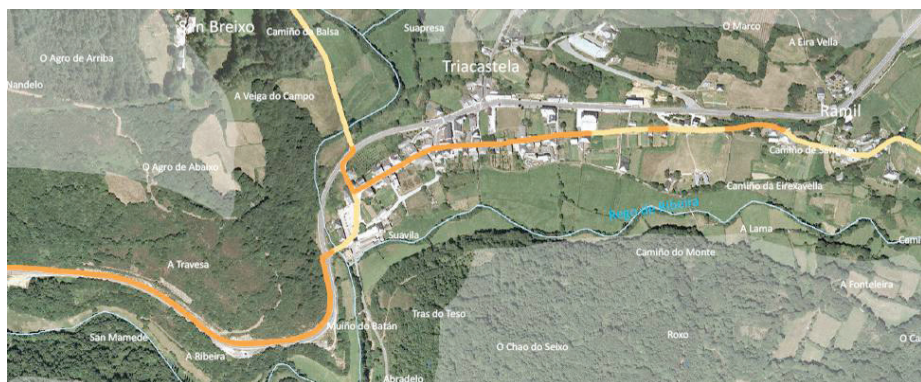


Figura 105. Tramos del camino según el ICC. En tonos anaranjados las zonas de menos y en azul las más seguras. Se aprecia como allí donde la ruta discurre por carretera el riesgo aumenta

4.4.3.2.3. Indicador de análisis integrado de los trazados del camino (IAC)

Con el objetivo de sintetizar aún más el análisis del camino y obtener una imagen instantánea de la situación del mismo en cada punto del itinerario se crea el IAC. Se calcula con la combinación de los índices de seguridad vial y de calidad percibida, y ofrece una visión de conjunto de todas las características del trazado.

Ecuación 26

$$IAC = 0,5 \cdot ISC + 0,5 \cdot ICC$$

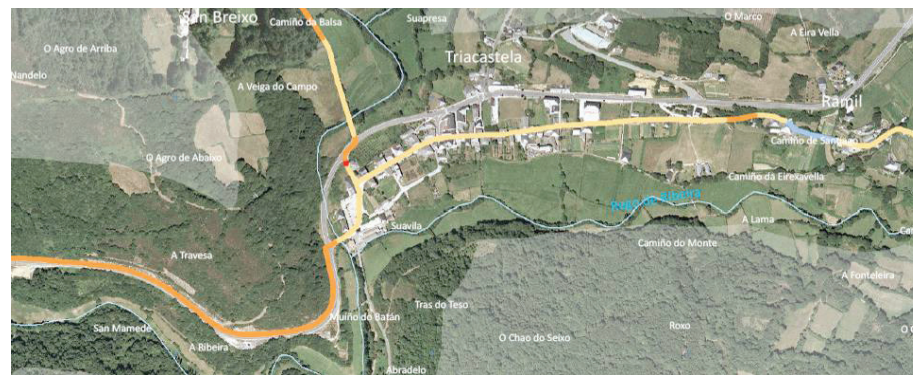


Figura 106. Tramos del camino según el IAC

4.4.3.2.4. Verificación de los indicadores

Al tratarse de indicadores de nueva creación es necesario una verificación de los valores arrojados, tarea que se llevó a cabo antes de la generación de los mismos para todos los trazados sujetos a estudio. Para realizar este proceso se calcularon indicadores en varios tramos del camino, en situaciones muy diferentes, en Melide y O Cebreiro. La elección de estos municipios fue motivada porque entre los dos encontramos una variedad de escenarios extrema, muy apropiada para la verificación. Melide es un término municipal en el cual el camino atraviesa zonas relativamente planas, con la presencia de un polígono empresarial que impacta directamente al trazado, así como el paso por villas importantes, como la capital del municipio. Por el contrario, O Cebreiro presenta una orografía montañosa y el camino atraviesa áreas con muy poca presencia humana.

Tras calcular los indicadores en estos municipios se sometieron a una revisión por parte del equipo técnico responsable de la caracterización en campo, para comprobar que los valores devueltos por los indicadores se ajustan a la reali-

Figura 108. Camino francés a su paso por el municipio de Palas de Rei

Este uso de esta metodología basada en sucesión geométrica de puntos, igualmente facilita la generación de indicadores geoespaciales, que constituyen una propuesta de sintetizar la cuantiosa información tomada en la caracterización histórica y técnica, tratando de presentar una visión más nítida y completa de cada uno de los ámbitos temáticos a los que hacen referencia. Los indicadores presentados, y las valoraciones de los parámetros que los sirven, sólo pretenden ser una muestra de las posibilidades existentes gracias a la metodología presentada, y ya avanzamos en nuevas posibilidades para analizar los trazados históricos del Camino de Santiago asociando información del entorno como el patrimonio asociado, las cuencas visuales, la certidumbre histórica del recorrido, etc. (Martínez Crespo, 2010)(Varela García et al., 2011), o para cualquier otro tipo de viario, como el caso de la planificación de una red de carreteras provinciales (Pardiñas Lamas et al., 2011).



5

Modelo de accesibilidad territorial de coste distancia condicionado

5.1. Consideraciones previas

5.1.1. Limitaciones del modelo de accesibilidad basado en el algoritmo Coste Distancia

5.1.2. Empleo del modelo isotrópico frente al anisotrópico

5.1.3. Elección del patrón de vecindad (ángulos de movilidad)

5.1.4. Semántica del modelo de accesibilidad Coste Distancia Condicionado

5.2. Descripción del método de Suma de Costes Parciales

5.3. Descripción del método de cálculo mediante Coste Distancia Condicionado

5.3.1. Definición de zonas de desplazamiento

5.3.1.1. Establecimiento de las zonas de desplazamiento para el análisis de las infraestructuras viarias en la accesibilidad territorial

5.3.2. Definición de la Matriz de Condiciones de Desplazamientos

5.3.3. Datos geográficos de entrada para la ejecución del modelo de accesibilidad territorial de Coste Distancia Condicionado

5.3.3.1. Definición geográfica de las Zonas de Desplazamiento para el análisis de las infraestructuras viarias en la accesibilidad territorial

5.3.3.2. Definición geográfica de los lugares fuente de desplazamientos

5.3.3.3. Definición de la Superficie de Costes Simples

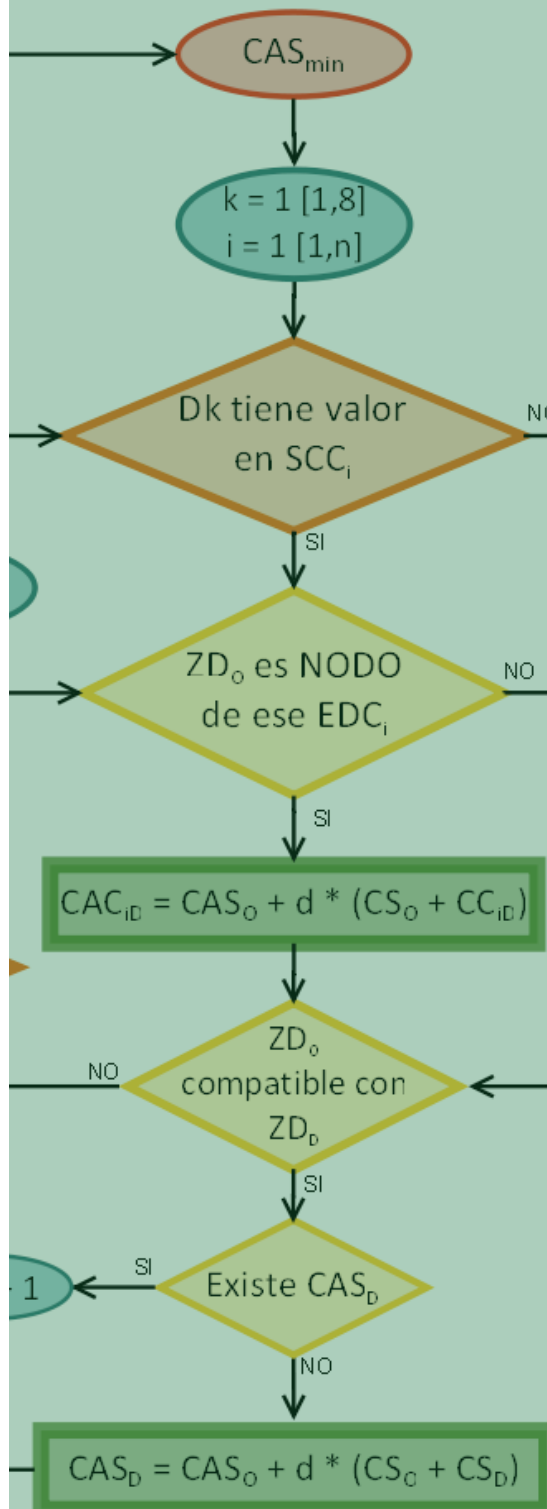
5.3.3.4. Definición de las Superficies de Costes Condicionados

5.3.4. Proceso de cálculo del modelo Coste Distancia Condicionado para el análisis de la accesibilidad territorial

5.3.5. Datos geográficos de salida tras la ejecución del modelo de accesibilidad territorial de Coste Distancia Condicionado

5.3.6. Ejemplo de cálculo de costes de desplazamiento mediante el Modelo de Coste Distancia Condicionado

5.3.7. Implementación del modelo de Coste Distancia Condicionado sobre gvSIG y SEXTANTE






5. Modelo de accesibilidad territorial de coste distancia condicionado

5.1. Consideraciones previas

El desplazamiento entre dos puntos cualquiera del espacio conlleva invertir un coste, que será mayor cuanto más alejados se encuentren, implicando mayor consumo de tiempo y energía (Olaya, 2011), entre otras variables. Para atender a estos factores y relacionarlos con la distancia recorrida, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen métodos y algoritmos de cálculo que permiten obtener ese coste, fundamentalmente mediante modelos vectoriales de análisis de redes o a través de modelos ráster de acumulación de costes.

El estudio y análisis de los modelos de accesibilidad implementados sobre SIG realizado en esta investigación, nos ha permitido valorar las ventajas de usar un formato ráster frente a un análisis de redes basado en el formato vectorial de los datos geográficos. Especialmente, el uso del modelo de Coste Distancia, implementado en diferentes trabajos llevados a cabo durante el proceso de realización de este estudio¹²², nos permite destacar dos importantes beneficios que supone el formato ráster frente al vectorial: la facilidad para obtener los datos iniciales para ejecutar el modelo, y la continuidad territorial de los resultados obtenidos en el cálculo de accesibilidad.

¹²² Durante el proceso de elaboración de la presente investigación se participó en diferentes proyectos de planificación y análisis sobre las infraestructuras viarias en Galicia, en los que se tuvo que desarrollar métodos de cálculo de accesibilidad territorial, en los que se pudieron comprobar algunos de los planteamientos que se recogen en este trabajo. Entre esos proyectos merece la pena destacar los siguientes: “Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica y Elaboración de Análisis Espaciales como Apoyo a la Realización del Plan de Carreteras de Galicia” en colaboración con la empresa BAU entre 2005 y 2007; “Proyecto de Sinalización Turística de Galicia” en colaboración con el Departamento de Geografía de la Universidad de Santiago de Compostela y la Consellería de Innovación e Industria da Xunta de Galicia entre 2008 y 2009; “Análisis de funcionalidad y accesibilidad viaria mediante la extracción masiva de datos geoespaciales del catálogo de carreteras de la provincia de Pontevedra” en colaboración con ICEACSA-PROYFE UTE Plan de Estradas entre 2009 y 2010; “Análisis de los corredores ecológicos de los ríos del ámbito del Plan de Ordenación del Litoral de Galicia” en colaboración con la Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras de la Xunta de Galicia en 2010, y aunque no trata específicamente de redes viarias, requirió el empleo del método de Coste Distancia aplicado al ámbito natural de las cuencas hidráulicas; “Análisis de la accesibilidad a las Vías de Alta Capacidad de Galicia dentro del Plan MOVE” en colaboración con ICEACSA-PROYFE UTE Seguimiento Plan MOVE durante el 2011.



La primera ventaja del modelo ráster se encuentra en la facilidad para la obtención de los datos empleados en el modelo. En el modelo vectorial de análisis de redes se requiere disponer de toda la red necesaria para establecer las comunicaciones, con la precisión suficiente para considerar todos los nodos de interés. Esta red formada por arcos y nodos, debe disponer además de una topología correcta entre todos los elementos, lo cual supone un esfuerzo importante para conseguirla, como ya comentamos anteriormente.

En la actualidad existen instituciones públicas y privadas que ofrecen datos del trazado y características de la red viaria de determinadas regiones, con distinto grado de precisión y con diferentes condiciones de uso. Sin embargo, estos datos no siempre reúnen las características necesarias, ni tienen la fiabilidad suficiente, ni en todas las ocasiones se pueden asumir las condiciones legales o económicas para poder emplearlos en los proyectos planteados. Además podemos encontrar muchas zonas geográficas del mundo, especialmente en países en vías de desarrollo o menos favorecidos dentro del sistema económico mundial, donde no se cuenta con este tipo de datos, y obtenerlos sería completamente inviable sin invertir los importantes recursos necesarios para ello, lo que en algún caso resultaría inadmisibile.

La obtención del formato ráster para la identificación de las infraestructuras viarias de una región puede acometerse con mucho menor gasto de tiempo mediante distintos procedimientos: digitalizando mapas analógicos en los que podamos diferenciar los distintos tipos de carreteras, rasterizando redes vectoriales sin topología, o a partir de la debida clasificación de imágenes aéreas o de satélite (Serrano Cambronero, 2001)(Weydahl, Eldhuset, Dick, & Langmoen, 2012), entre otras posibilidades¹²³. (Bemmelen et al., 1993) ya ponían de manifiesto esta ventaja de los algoritmos basados en el formato ráster para el cálculo de desplazamientos frente a los basados en el formato

vectorial. Pese a que la solución fuese sólo aproximada y no tuviese la exactitud del modelo vectorial, la dificultad de conseguir una red vectorial completa y satisfactoria, reduce sus opciones de uso en muchos ámbitos de trabajo, y aumenta la generalización del modelo ráster para los cálculos de accesibilidad.

El segundo planteamiento ventajoso de usar un modelo ráster, se basa en que mediante él se puede obtener información de la accesibilidad en cualquier lugar del territorio, no sólo en los nodos de la red topológica considerada. Emplear un modelo ráster considera en su conjunto todo el territorio de análisis, sin tener que definir inicialmente en qué lugares vamos a querer obtener los valores de accesibilidad obtenidos en los cálculos. Aunque a partir de los modelos vectoriales se puede posteriormente hacer diferentes interpolaciones para conseguir valores de accesibilidad en todo un ámbito geográfico, en general, este proceso de interpolación debe considerar tantas variables para ajustarse correctamente al entorno territorial de estudio, que complicaría aún más el cálculo de la accesibilidad. Resulta mucho más sencillo, eficiente y rápido emplear un modelo ráster para conseguir caracterizar cualquier punto del territorio mediante los cálculos de accesibilidad que se establezcan.

La capacidad del método Coste Distancia para recorrer todas las celdas que definen una región, considerando la dificultad que tiene atravesarlas, y otorgarle a cada una de ellas, el valor del coste mínimo que supone llegar hasta la celda más cercana tomada como referencia, lo convierten en un método de extraordinaria potencia para analizar la accesibilidad territorial, como ya vimos en el apartado 3.4.1.

Sin embargo, la consideración de que todas las celdas poseen la misma funcionalidad en el cálculo de los desplazamientos, genera ciertas incongruencias con el comportamiento real de los desplazamientos territoriales, especialmente con infraestructuras de transporte que dispongan de limitación de accesos. Por este motivo se plantea en esta investigación profundizar en el modelo de coste distancia, pero aplicando nuevos métodos que permitan un cálculo de accesibilidad más cercano a esta realidad.

¹²³ Por ejemplo, desde el proyecto OpenStreetMap (<http://www.openstreetmap.org>) se está haciendo un esfuerzo a través de su editor de geometrías iD (<http://www.mapbox.com/blog/announcing-id/>) para la extracción de entidades geográficas desde imágenes de satélite mediante una interfaz simplificada y de fácil utilización: <http://www.mapbox.com/blog/user-friendly-guided-feature-extraction/>



5.1.1. Limitaciones del modelo de accesibilidad basado en el algoritmo Coste Distancia

Como se ha descrito en el apartado 3.4, el método de cálculo de accesibilidad basado en el algoritmo Coste Distancia considera que se puede desplazar sobre todas las celdas que tengan asignado un coste de desplazamiento. Las únicas celdas que no se tienen en cuenta en el proceso son las que se configuran como celdas sin dato¹²⁴. Sin embargo, en la realidad, en los desplazamientos terrestres nos encontramos con infraestructuras de transporte que permiten moverse longitudinalmente sobre las mismas, pero no posibilitan la conexión transversal hacia las zonas laterales. Las autopistas, las autovías y otras vías de alta capacidad son claros ejemplos de esta circunstancia en la estructura viaria. En el caso del transporte por ferrocarril, las vías ferroviarias también ofrecen un desplazamiento claramente diferenciado en el territorio, donde las conexiones se establecen únicamente en puntos concretos del recorrido longitudinal de los trenes, como son las estaciones o apeaderos.

El método de cálculo de accesibilidad mediante el Coste Distancia se ha empleado asiduamente en multitud de estudios y análisis del diagnóstico del funcionamiento de las infraestructuras de transporte, y en el estudio de las políticas de transporte de las regiones, como ya destacamos en el apartado 3.4.1. Aunque es difícil encontrar en la bibliografía descripciones detalladas de cómo implementar el modelado coste-distancia (Lage Reis-Correia, 2010), y se echa en falta una descripción de los algoritmos usados o propuestos en muchas publicaciones (Yu et al., 2003), y de los datos reales utilizados para obtener la superficie de costes empleada en los cálculos, esta problemática de resolver la correcta implementación de infraestructuras con limitación de accesos en el modelo Coste Distancia, ya ha sido puesta de manifiesto en diferentes ocasiones (Husdal, 2000; Juliao, 1999). Se constata que este modelo Coste Distancia, imposibilita hacer cálculos de accesibilidad precisos en ámbitos

territoriales acotados donde exista un viario de altas prestaciones que únicamente se conecta con el resto de la red en enlaces y puntos muy determinados de su trazado. Sin embargo esta modelización inadecuada del comportamiento real de estas infraestructuras, en principio se salva parcialmente cuando las dimensiones del territorio analizado aumentan, pues la distancia de decenas de kilómetros existente normalmente entre enlaces, en principio pierde importancia en estudios que aborden tramos territoriales de centenares o miles de kilómetros de longitud de ese tipo de viario.

En cualquier caso, el empleo de este método en estos casos está introduciendo un error en las hipótesis de partida que condiciona inevitablemente los resultados. Además, esta variación entre la realidad y el modelo del cálculo, imposibilita usarlo en ámbitos particularmente relevantes en este tipo de fenómenos como podría ser los entornos urbanos o metropolitanos.

Alguna alternativa planteada, como la incorporación de direcciones de flujo en las celdas para definir las conexiones con sus vecinas, implementado por ejemplo en el software MFworks (Husdal, 2000), que ya comentamos en el apartado 3.4.1, también genera múltiples inconvenientes. En primer lugar, está pensado para modelar exclusivamente redes viarias (Figura 109), con lo que las direcciones de flujo asignadas a las celdas que representan las carreteras, no permiten la conexión con las celdas vecinas que representen otros elementos territoriales, con lo que se pierde el tratamiento del territorio como una superficie continua, y se desprecian muchos desplazamientos posibles. Tampoco tiene en cuenta los cruces a distinto nivel, y aunque Jan Husdal plantea una solución identificando 24 celdas vecinas en lugar de las 8 normalmente consideradas (Figura 41), esta propuesta también entraña problemas cuando la resolución empleada obligue a que el “salto” a realizar para establecer la conexión, deba ser de más de una celda. La aparente desaparición de este programa MFworks, y la inexistencia de funcionalidades similares en los SIG actuales, puede darnos una idea de que el método propuesto no ha tenido una aceptación suficiente en la comunidad de usuarios de estas aplicaciones, posiblemente por sus limitaciones y complejidad de su utilización.

¹²⁴ El valor “NoData” de muchos programas SIG se traduce en un número entero negativo que raramente, por no decir nunca, aparece en un análisis geográfico. SEXTANTE, por ejemplo, opta por el número “-99.999”

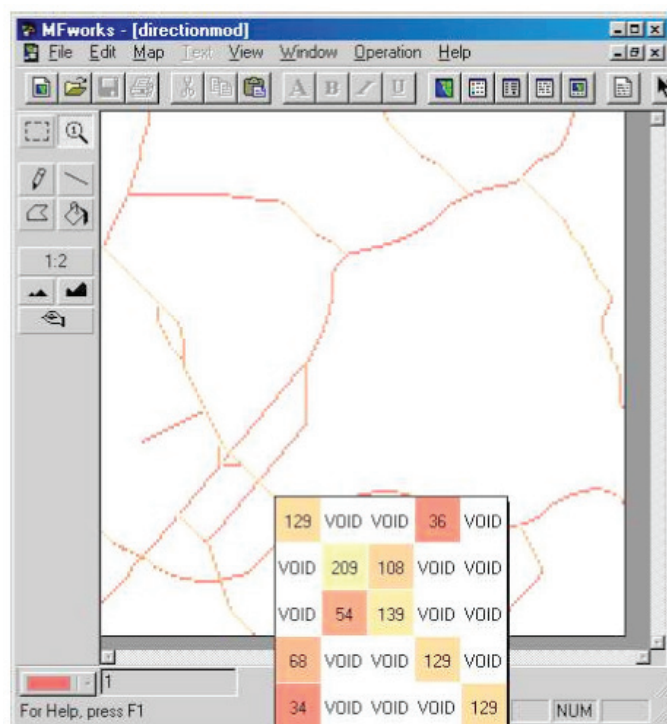


Figura 109. Ventana del programa MFworks para asignar direcciones a las celdas que representan una red viaria (Husdal, 2000)

Para dar una respuesta correcta a la realidad de los desplazamientos terrestres, en este proyecto nos apoyamos en las capacidades de análisis y cálculo de los SIG, para formular dos alternativas que tienen en cuenta los desplazamientos diferenciados de las infraestructuras de transporte dentro de una región. Denominaremos los dos métodos propuestos como método de Suma de Costes Parciales y método de Coste Distancia Condicionado. Los planteamientos que desarrollamos se podrían aplicar a cualquier tipo de infraestructura de transporte terrestre que se base en nodos específicos para interactuar con el resto del territorio, mediante enlaces, paradas, estaciones, etc. como el caso del ferrocarril o el transporte por autobús. Sin embargo, en la presente memo-

ria nos centraremos en considerar principalmente las infraestructuras viarias de alta capacidad o altas prestaciones, como las autopistas, autovías, etc.

El método de Suma de Costes Parciales se basa en calcular los costes o tiempos parciales de desplazamiento desde cada punto del territorio al enlace de una vía de alta capacidad más cercano, así como los costes empleados entre cada enlace circulando por esa vía específica. Con este método, empleando como base únicamente el algoritmo de Coste Distancia actual, se pueden calcular los costes de desplazamiento teniendo en cuenta la influencia de las vías de alta capacidad, mediante una sistematización de procesos, que luego describiremos.

El método de Coste Distancia Condicionado se basa en un nuevo algoritmo de cálculo en el SIG, en el que se incorporan restricciones en los desplazamientos, además de atender a diferentes superficies de costes o fricción en función de los diferentes modos o infraestructuras de transporte. Esta alternativa es más compleja que la anterior, pero también obtiene resultados más satisfactorios, y el planteamiento del método empleado abre nuevas posibilidades para realizar cálculos condicionados mediante SIG. Aunque en esta memoria su empleo se centra en el cálculo de la accesibilidad mediante la red viaria, su funcionalidad potencial creemos que amplía las posibilidades de uso en nuevos análisis geoespaciales que estudien e interpreten diferentes fenómenos de dispersión, movilidad, o desplazamiento que puedan ocurrir sobre la superficie terrestre.

A lo largo de este capítulo describiremos con detalle cada uno de estos métodos.

5.1.2. Empleo del modelo isotrópico frente al anisotrópico

Aunque los procedimientos de cálculo de costes que se describen en este capítulo podrían aplicarse de forma general a un análisis basado en un modelo anisotrópico, se ha optado por plantear un análisis isotrópico que evite aumentar la complejidad de la explicación de los nuevos conceptos planteados, y de las operaciones que se han tenido que realizar durante toda la investigación.



Como hemos visto en el apartado 3.4.2, plantear un análisis anisotrópico, aunque pudiese generar mayor grado de precisión en los resultados, implicaría una mayor preparación de los datos iniciales, un cálculo más complejo y un mayor tiempo de ejecución. Puesto que en este estudio, los resultados alcanzados en las operaciones no son determinantes para los objetivos de la investigación, se ha preferido recurrir al empleo de un modelo isotrópico. Así se consigue disponer y tratar de forma rápida los datos base requeridos en los nuevos métodos de cálculo planteados, y se agiliza en la medida de lo posible los tiempos de procesamiento de los ensayos.

Las infraestructuras viarias son el elemento principal de los desplazamientos territoriales considerados en los ensayos y análisis de esta investigación. La diferencia de costes de desplazamiento entre la movilidad que se tiene por carretera frente a la movilidad a pie por el terreno es muy importante, por lo que en general, son las infraestructuras viarias en último término, las que condicionan con más relevancia los costes acumulados alcanzados. La propia configuración de estas infraestructuras de geometría lineales, aporta una escasa presencia superficial en recorridos en sentido perpendicular a la dirección de su eje. Ello implica que la repercusión de cruzar cualquier viario entre sus bordes, apenas tendrá una influencia significativa en los cálculos finales, pese a considerar el mismo coste de desplazamiento para cualquier dirección que se tome desde una celda que represente a una carretera. Es decir, para calcular la accesibilidad a lugares cercanos a infraestructuras viarias, considerar un análisis isotrópico, a priori, no va a suponer una diferencia destacada con respecto al análisis anisotrópico.

En el caso de que fuese preciso implementar un análisis anisotrópico sobre los dos métodos propuestos en esta investigación, en principio parece más sencillo hacerlo empleando el procedimiento propuesto de disponer de ocho superficies de coste (Romo Peña & Torres Cantero, 2011), pues los cálculos se realizarían con la misma función de coste distancia, empleando en cada cálculo la superficie de coste correspondiente según la dirección de movimiento escogida de entre las ocho posibles. Los otros métodos de cálculo anisotrópico

implican un cambio en las fórmulas matemáticas con lo que su implementación podría ser un poco más compleja.

En cualquier caso, pese a que los desarrollos, implementación y ensayos realizados con los métodos propuestos en esta investigación utilizan el análisis isotrópico, tanto el método de Suma de Costes Parciales, como el método de Coste Distancia Condicionado serían perfectamente aplicables sobre un análisis anisotrópico.

5.1.3. Elección del patrón de vecindad (ángulos de movilidad)

Normalmente el algoritmo Coste Distancia utiliza el patrón de vecindad o de movilidad considerado es el que 8 celdas, o como hemos denominado en esta memoria, de patrón de Rey, aunque podría también atender a otros ángulos de movilidad diferentes. Considerar un número mayor de conexiones permitidas para los desplazamientos desde la celda central, significa un aumento considerable del tiempo de cálculo, que en este trabajo sería una dificultad añadida. (Lage Reis-Correia, 2010) comparan un algoritmo de acumulación de costes con patrón de 8 y de 16 celdas, obteniendo resultados prácticos de costes acumulados, prácticamente iguales sobre terreno montañoso y muy similares sobre terreno llano. Además incluir un patrón de vecindad mayor a 8 celdas, podría hacer que el algoritmo saltase alguna celda vecina que estuviese estableciendo una condición de desplazamiento en el método de Coste Distancia Condicionado. Por todo ello, en los dos métodos propuestos en este trabajo de investigación, basados en el algoritmo de Coste Distancia, adoptamos definitivamente el patrón de movilidad de 8 celdas, o patrón de Rey.

5.1.4. Semántica del modelo de accesibilidad Coste Distancia Condicionado


Durante la explicación del modelo propuesto para el cálculo de accesibilidad Coste Distancia Condicionado (CDC), se utilizarán conceptos conocidos en el método de Coste Distancia, mezclados con nuevas definiciones de elementos necesarios para el funcionamiento del CDC. Con la finalidad de aclarar las

dudas que pudiesen surgir en la lectura de la descripción del modelo CDC, se definen los principales elementos que intervienen en este nuevo método.

- **RÁSTER:** Formato de datos geográfico implementado sobre los SIG, que se basa en dividir de forma sistemática todo el territorio a definir, mediante un conjunto de unidades elementales, llamadas celdas, que recogen el valor que describe ese lugar, y que conforman una malla siguiendo un patrón determinado a partir de celdas contiguas no solapadas, y normalmente cuadradas regulares. El tamaño de la celda, denominado resolución, determina la precisión con la que se recoge una variable dentro de una capa ráster. Tanto el modelo de Coste Distancia como el propuesto de Coste Distancia Condicionado se basan en el empleo de datos en formato ráster para realizar los cálculos y obtener los resultados.
- **FUENTE:** Celda, o conjunto de celdas, sobre la que se inicia el proceso iterativo de cálculo del mínimo coste acumulado en los desplazamientos sobre el resto de celdas que conforman la malla rectangular que representa el territorio de análisis. Las celdas fuente pueden ser una o varias, y pueden estar agrupadas formando una zona o dispersas sobre lugares diferentes de la malla.
- **SUPERFICIE DE COSTES** (o superficie de fricción):
 - o **Superficie de Costes Simples (SCS):** La Superficie de Costes Simples es una capa ráster para todo el ámbito de estudio, donde cada celda tiene el valor que representa, la fricción o coste que ofrece al ser atravesada.
 - o **Superficie de Costes Condicionados (SCC):** la Superficie de Costes Condicionados es una capa ráster para todo el ámbito de estudio, donde cada celda tiene el valor que representa la fricción o coste que ofrece al ser atravesada, pero sólo en aquellas celdas que conforman el Espacio de Desplazamiento Condicionado al que represente esa SCC. Los valores de las celdas de una SCC serán en general diferentes a los valores de esas mismas celdas en la

SCS, con lo que esos lugares dispondrán de al menos dos costes de desplazamientos diferentes, y por tanto se podrá calcular en ellas al menos dos costes acumulados distintos.

- **ZONA DE DESPLAZAMIENTO:** una Zona de Desplazamiento representa aquellos lugares geográficos que cuentan con unas características similares propias, que determinan las condiciones de desplazamiento particulares que establecerán los costes que supone atravesar esas áreas de movilidad.
 - o **Zona de Desplazamiento Condicionado:** la zona de desplazamiento condicionado determina el ámbito ocupado por aquellos lugares con modos de desplazamiento específicos o por algún tipo elemento territorial, o de infraestructura de transporte, con limitaciones de acceso salvo en puntos determinados de su geometría.
- **ESPACIO DE DESPLAZAMIENTO CONDICIONADO (EDC):** El Espacio de Desplazamiento Condicionado representa los lugares compuestos por una zona de desplazamiento condicionado que presenta restricciones intrínsecas en los movimientos que la comunican con las zonas vecinas, y por la zona de desplazamiento, denominada Nodo, que permite su comunicación con el resto del territorio. Un EDC permite que puedan coexistir varios tipos de desplazamiento en esos lugares, incluyendo modos de transporte con desplazamiento restringido o con características particulares en su recorrido.
- **NODO DE DESPLAZAMIENTO O DE COMUNICACIÓN:** Un nodo representa aquel o aquellos lugares que posibilitan la conexión de una zona de desplazamiento condicionado con el resto de zonas de desplazamiento que definen un territorio. Este nodo será la zona geográfica en la que permite transformar un coste acumulado condicional en coste acumulado simple, y viceversa.
- **ORIGEN-DESTINO:** Durante el proceso iterativo de cálculo, la celda Origen será aquella que presenta el menor coste acumulado de des-



plazamiento de todos los existentes en ese momento de la operación. Desde esta celda Origen se procede a realizar un nuevo cálculo para obtener el coste acumulado de sus celdas vecinas. Cada una de las celdas vecinas en el momento de interactuar para establecer el coste de desplazamiento con la celda Origen, se denominarán celda Destino.

- **DESPLAZAMIENTO:** Acción de atravesar un territorio desde un lugar a otro, y que en el formato ráster se representa por el paso desde el centro de una celda al centro de otra celda distinta. Los desplazamientos admitidos en este trabajo se basan en la conexión de una celda origen con las 8 celdas destino contiguas a ella.
- **CELDA LATENTE:** Toda celda distinta de las celdas Fuente, con valor diferente a nulo, que pertenece a una Superficie de Costes, y sobre la que aún no se ha calculado un coste acumulado de desplazamiento. Una celda latente participará en el proceso de cálculo del coste acumulado.
- **CELDA ACTIVA:** Cualquier celda latente tras calcular sobre ella un coste acumulado de desplazamiento. La celda activa seguirá participando en el proceso de cálculo hasta conseguir alcanzar sobre ella el menor coste acumulado de desplazamiento, momento en el que pasará a celda cerrada.
- **CELDA CERRADA:** Cualquier celda activa tras calcular sobre ella el menor coste acumulado de desplazamiento posible hasta una celda fuente. El valor de esa celda participará en el resultado final del cálculo de accesibilidad.
- **COSTE ACUMULADO SIMPLE (CAS):** Resultado del proceso de cálculo del método de Coste Distancia Condicionado, que representa para cada celda latente de la Superficie de Costes Simple, el valor que supone llegar desde ella a la celda fuente más próxima (en función del parámetro de medida usado - tiempo, distancia, etc.-).
- **COSTE ACUMULADO CONDICIONADO (CAC):** Resultado del proceso de cálculo del método de Coste Distancia Condicionado, que repre-

senta para cada celda latente de cada Superficie de Costes Condicionados especificada, el valor que supone llegar desde ella a la celda fuente más próxima (en función del parámetro de medida usado - tiempo, distancia, etc.-).

- **COSTE ACUMULADO GLOBAL (CAG):** Resultado final del proceso de cálculo del método de Coste Distancia Condicionado, que representa para cada celda de las Superficies de Costes, el valor mínimo de los obtenidos en el CAS y en cada uno de los CAC calculados, y que supone el mínimo coste de llegar desde esa celda a la celda fuente más próxima (en el parámetro de medida usado - tiempo, distancia, etc.-), atendiendo a todas las posibilidades y condiciones de desplazamiento consideradas.

5.2. Descripción del método de Suma de Costes Parciales

El método de cálculo mediante Suma de Costes Parciales se basa en la utilización del algoritmo Coste Distancia ya conocido, pero que en esta metodología debe ejecutarse tres veces para atender a la diferente modalidad de desplazamiento que ofrecen las Vías de Alta Capacidad (VAC) sobre el territorio. El cálculo de estos costes y los resultados obtenidos en ellos deben ser tratados con orden y rigor para conseguir el efecto deseado, que no es otro que incluir en los cálculos de accesibilidad que se realicen en una región, los desplazamientos por la autopista o la autovía como opción factible en los recorridos posibles.

La operatividad a seguir para alcanzar el cálculo final se basa en realizar tres cálculos de costes de desplazamiento acumulado:

- Por un lado tenemos el coste calculado desde los lugares sobre los que se quiere conocer la accesibilidad. A estos lugares les llamaremos FUENTE, puesto que ellos son los que originan los desplazamientos para acceder desde ellos a cualquier sitio, o para ir desde cualquier ubicación de la región estudiada hasta esos lugares (Figura 110). En este caso se emplea una superficie de costes sin tener en cuenta la autopista, pues como hemos descrito anteriormente, generaría

resultados erróneos al considerar accesos a la misma en cualquier punto de su recorrido. De esta forma obtenemos los costes de desplazamiento desde cualquier lugar a la fuente más cercana (), entendiendo cercanía como el menor coste acumulado para comunicar ambos puntos¹²⁵.

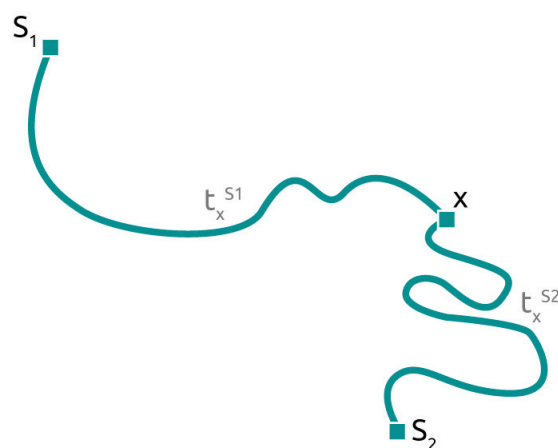


Figura 110. Cálculo del coste acumulado desde cualquier celda (X) del territorio a la celda fuente (S) más cercana.

- Por otro lado debemos calcular los costes desde cualquier lugar a los enlaces con la autopista, pero nuevamente sin considerar esta infraestructura en la superficie de costes o de fricción. Los enlaces se convertirán ahora en las celdas fuente del proceso de cálculo del algoritmo de Coste Distancia. En este caso además del coste acumulado, se necesita calcular también la zonificación de cada enlace. Estas zonas representan todos los lugares que son más cercanos, en cuanto a costes acumulados calculados, al enlace al que pertenece ese ámbito.

¹²⁵ Durante todo el análisis se entiende proximidad o cercanía entre dos lugares, a aquellos en los que se obtenga el menor coste acumulado en el desplazamiento entre ellos, ya sea tiempo, energía, distancia, o la variable de coste que se considere. Como generalmente es el tiempo el coste más empleado es este tipo de análisis, se denominarán los costes como letra "t" aunque podría referirse a cualquier otro tipo de coste (energético, geométrico, físico, etc.).

Con ello en cada lugar tenemos, no solo el coste de acceso al enlace más próximo de la autopista ($t_{\text{enlace}_k}^x$), sino que sabremos de qué enlace se trata (enlace_k) para cualquier punto del territorio analizado (Figura 111).

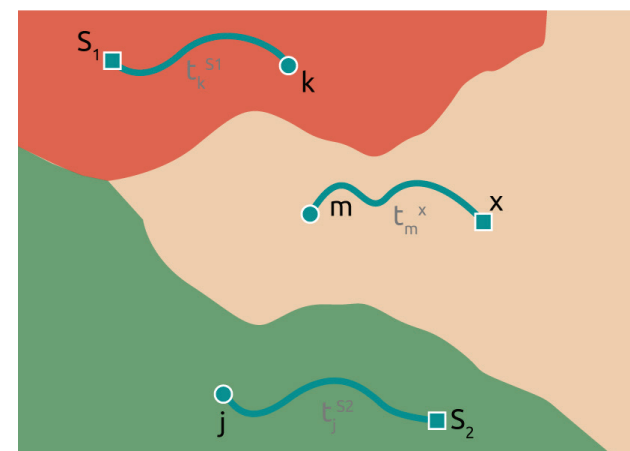


Figura 111. Cálculo del coste acumulado y la zonificación desde cualquier celda (X) del territorio al enlace VAC más cercano, en este caso (k, j, m)

- Por último es necesario obtener también el coste de desplazamiento dentro de la autopista, por lo que debe calcularse individualmente el coste desde cada enlace de la autopista a cualquier punto de la misma. En este caso, la superficie de costes a usar simplemente es la que corresponda al trazado de la autopista (Figura 112). Este paso requiere realizar un análisis de Coste Distancia individual para cada uno de los enlaces considerados en la VAC, y posteriormente realizar un cuidadoso proceso para muestrear cada enlace, y obtener los costes o tiempos desde ese lugar a cada uno de los demás enlaces. Al final de este proceso se obtiene una matriz origen-destino con los costes entre cada par de enlaces k, m ($t_{\text{enlace}_k}^{\text{enlace}_m}$).

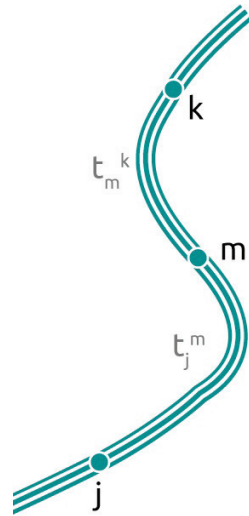


Figura 112. Cálculo del coste acumulado desde cualquier celda del trazado VAC a cada uno de los enlaces.

Para cada una de las fuentes iniciales considerados en el análisis de accesibilidad, el cálculo del coste de desplazamiento desde un punto cualquiera del territorio teniendo en cuenta las vías de alta capacidad (Figura 113), será el resultado de sumar los tiempos o costes parciales que se emplean en el recorrido:

Ecuación 27

$$t_{VAC_{fuente_i}^X} = t_{enlace_k}^{fuente_i} + t_{enlace_k}^{enlace_m} + t_{enlace_m}^X$$

$t_{VAC_{fuente_i}^X}$; es el coste o tiempo teniendo en cuenta las vías de alta capacidad, entre un punto cualquiera (X) y la fuente i considerada, entre todas las existentes. Este cálculo se realiza para cada uno de los lugares fuente que se consideren en el análisis de accesibilidad.

$t_{enlace_k}^{fuente_i}$; es el coste o tiempo entre el punto o zona considerada como fuente ($fuente_i$) y el enlace más próximo a ese lugar ($enlace_k$).

$t_{enlace_m}^X$; es el coste o tiempo entre un punto cualquiera (X) del territorio de análisis considerado y el enlace más próximo a él ($enlace_m$).

$t_{enlace_k}^{enlace_m}$; es el coste o tiempo entre los dos enlaces necesarios en la comunicación entre el punto fuente ($fuente_i$) situado en la zona del $enlace_k$ y el punto destino (X), situado en la zona del $enlace_m$. Este valor se obtiene del cálculo en el que la superficie de costes usada corresponde únicamente al trazado de la vía de alta capacidad.

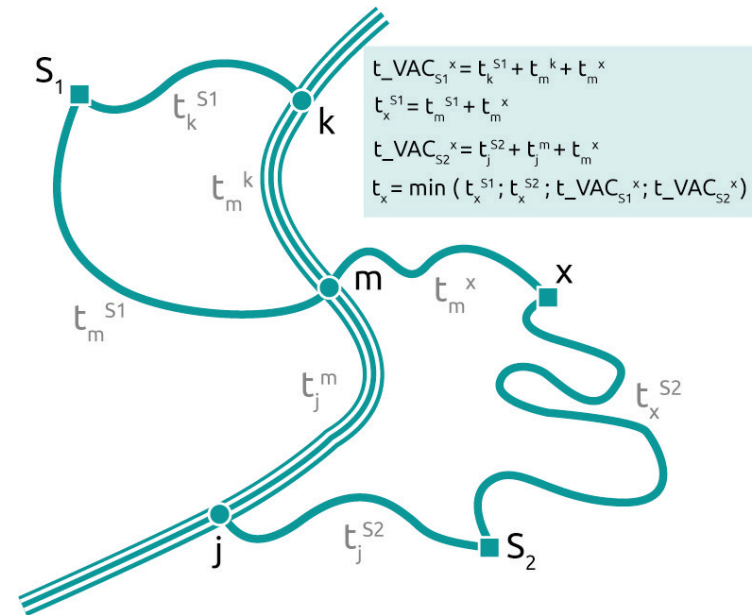


Figura 113. Esquema gráfico del funcionamiento del método de Suma de Costes Parciales.

Los sumandos $t_{enlace_k}^{fuente_i}$ y $t_{enlace_m}^X$ se obtienen del archivo resultante de calcular los costes a los enlaces de la VAC. La ubicación de los puntos ($fuente_i$) y (X) pertenecen a alguna de las zonas de los enlaces, por lo que se puede determinar para cada punto cuál es el enlace más cercano que le corresponde ($enlace_k$) o ($enlace_m$). Con ello, en la matriz Origen/Destino calculada previamente se obtiene el sumando correspondiente $t_{enlace_k}^{enlace_m}$, con el coste entre ambos enlaces.

El resultado final, es decir el menor coste de desplazamiento desde cualquier punto a cualquiera de las fuentes considerados en el análisis, teniendo en cuenta que pueden emplearse las vías de alta capacidad para los desplazamientos, será el mínimo de los valores obtenidos en todos los cálculos realizados:

Ecuación 28

$$t_X = \min_{i=1,n}(t_{fuente_i}^X; t_{VAC_{fuente_i}}^X)$$

t_X ; es el menor coste o tiempo de un punto cualquiera (X) de la región de estudio, para acceder a, o desde, algunos de los lugares fuente considerados en el análisis de accesibilidad, teniendo en cuenta todos los factores de desplazamiento existentes en ese territorio, incluidas las vías de alta capacidad.

$t_{fuente_i}^X$; es el coste o tiempo de un punto cualquiera (X) de la región de estudio, para acceder al lugar fuente más cercano, o desde él, considerando la superficie de fricción sin las vías de alta capacidad¹²⁶

$t_{VAC_{fuente_i}}^X$; es el coste o tiempo, teniendo en cuenta las vías de alta capacidad, entre un punto cualquiera (X) de la región de estudio, para acceder al lugar $fuente_i$ más cercano¹²⁷ de entre las n fuentes considerados en el análisis de accesibilidad, o desde esa fuente cercana al punto (X).

De esta forma, cada celda se quedará con el menor valor de entre todos los calculados, asegurando que esa cifra es el menor coste acumulado para desplazarse a, o desde, ella a una de las celdas fuente consideradas, ya sea empleando una vía de alta capacidad en su recorrido, o sin usar estas infraestructuras.

¹²⁶ En este caso el propio algoritmo Coste Distancia permite calcular desde el punto (X) el coste acumulado únicamente a la $fuente_i$ más cercana, sin que sea necesario calcular en cada punto el coste acumulado a los n lugares fuente.

¹²⁷ Se recuerda, que se utiliza el término cercano para indicar que se trata del lugar que genera menor coste en el desplazamiento para acceder al punto (X), o desde ese punto.

Este método obtiene resultados más satisfactorios que otros análisis de accesibilidad en los que no se consideran las vías de alta capacidad existentes en el entorno de análisis, o lo hacen de forma parcial. Sin embargo, su implementación sigue mostrando debilidades pues al no considerar el trazado de las VAC existentes en el cálculo de algunos de los costes acumulados (por ejemplo en), no aparecen los efectos barrera que estas infraestructuras generan sobre el territorio que impide la comunicación entre zonas a ambos márgenes, salvo que exista un paso a distinto nivel que lo posibilite. Podría llegar a considerarse modelizar estos aspectos, de forma que la superficie de fricción sin considerar las VAC, tuviese como valor nulo el trazado de las mismas salvo en las zonas de paso. En este caso, si se tuviese el cuidado de dejar activas las celdas con zonas de cruce a distinto nivel de carreteras convencionales con las VAC, se obtendrían valores más reales en los cálculos.

Sin embargo, este Método de Suma de Costes Parciales, requiere un laborioso proceso de tratamiento de resultados intermedios, para valorar individualmente los costes entre cada lugar y cada uno de los orígenes considerados, entre cada uno de los enlaces existentes en cada una de las vías de alta capacidad que hubiese en la región de estudio, asignando a cada lugar el enlace más próximo que le correspondiese, etc. Ello supone además de un gran esfuerzo para sistematizar todos los procesos, unos tiempos de cálculo que lo convierten en un método de poca agilidad. Pese a conseguir resultados satisfactorios, optamos por buscar otro método con menos interacciones, más robusto y de mayor comodidad para su empleo por usuarios sin altos conocimientos de los geoprocesamientos de los SIG. Esta nueva alternativa se materializa en el algoritmo de Coste Distancia Condicionado que se describe en el siguiente apartado.



5.3. Descripción del método de cálculo mediante Coste Distancia Condicionado

El modelo Coste Distancia Condicionado (CDC) desarrollado en este proyecto de investigación se basa en el funcionamiento del algoritmo Coste Distancia, pero modificando su operatividad en función de las restricciones o condiciones específicas de algunos de los datos de entrada. El objetivo de este algoritmo CDC es poder considerar conjuntamente en los desplazamientos de una región la aportación de diferentes modos de transporte compartidos o infraestructuras superpuestas en un mismo lugar. Este método añade un sistema de condiciones que permite ajustar más a la realidad, la modelización y el cálculo de los desplazamientos sobre el modelo ráster usado en un SIG, ofreciendo mayor flexibilidad y nuevas posibilidades a la hora de analizar la accesibilidad territorial con estos sistemas.

El método Coste Distancia Condicionado atiende a las distintas características de movilidad en las infraestructuras o en los espacios geográficos por los que se podría transitar, pudiendo especificar limitaciones en el paso de unas a otras si fuese preciso. En función de lo que se pretenda analizar, se considerará el desplazamiento de un determinado objeto, individuo, elemento o fenómeno natural o artificial, que tenga un comportamiento en sus movimientos sobre el territorio, que pueda ser modelizado mediante un SIG ráster. Aunque en la presente investigación únicamente se considera para los cálculos y ensayos, el desplazamiento del ser humano a pie o en automóvil, todo el desarrollo del modelo CDC elaborado, podría usarse sin problema para estudiar cualquier otro tipo de casos de especies animales, vegetales o cualquier elemento o fenómeno que tenga unas pautas de desplazamiento definidas sobre el territorio.

La base de este algoritmo se fundamenta en dos requisitos. En primer lugar, se permite imponer una serie de restricciones en los desplazamientos entre los diferentes tipos de zonas previamente identificadas en la región a analizar, fijando los permisos y las prohibiciones de comunicación entre ellas, que se concretan en la **Matriz de Condiciones de Desplazamientos** que se describirá

más adelante. Además en este algoritmo está permitido que un lugar disponga de diferentes costes de desplazamiento para atravesarlo según el tipo de infraestructura o modo de transporte usado, por lo que en este modelo Coste Distancia Condicionado se emplearán varias Superficies de Costes. Estas capas ráster que identifican los costes del ámbito territorial analizado, se concretan en una **Superficie de Costes Simples**, similar a la única Superficie de Costes usada en el modelo original Coste Distancia, y las **Superficies de Costes Condicionados** que sean necesarias en función de los diferentes modos de desplazamiento compartido o superpuesto que se tengan en cuenta.

Debido a estos requisitos, el algoritmo CDC precisa partir de más información que en el de Coste Distancia, y obtiene también más archivos de resultados. Mientras el método Coste Distancia utiliza un dato para situar las fuentes de desplazamiento y una superficie de costes para valorar esa movilidad por el territorio, el método Coste Distancia Condicionado emplea un archivo que recoge todas las **Zonas de Desplazamiento**, además de los lugares fuente que originan los desplazamientos; varios archivos con las superficies de costes según los tipos de movilidad condicionada a estudiar, que incluyen una **Superficie de Costes Simples (SCS)** similar a la empleada en el método de Coste Distancia, en la que todas las celdas no nulas presentan valor, y al menos una **Superficie de Costes Condicionados (SCC)**, donde tendrán valor únicamente las celdas que presenten dos tipos de movilidad; y además, este método condicionado necesita establecer una **Matriz de Condiciones de Desplazamiento** que fija la compatibilidad de comunicación para el cálculo del coste acumulado simple de los desplazamientos entre las zonas definidas en esa región.

El resultado final de los métodos evidentemente también difiere, pues el método Coste Distancia llega a un resultado único del Coste Acumulado desde cada fuente a cualquier punto del territorio estudiado, mientras el modelo Coste Distancia Condicionado obtiene el **Coste Acumulado Simple (CAS)**, similar al anterior, y además los **Costes Acumulados Condicionados (CAC)** para cada superficie de costes condicionados empleados en el cálculo. El resultado final del Coste Acumulado obtenido en el algoritmo Coste Distancia Condicio-

nado, se denominará **Coste Acumulado Global (CAG)**, pues tendrá en cuenta el coste acumulado simple y todos los costes acumulados condicionados. En la **Figura 114** se puede observar un esquema con los datos necesarios para ejecutar el algoritmo CDC y los resultados obtenidos.

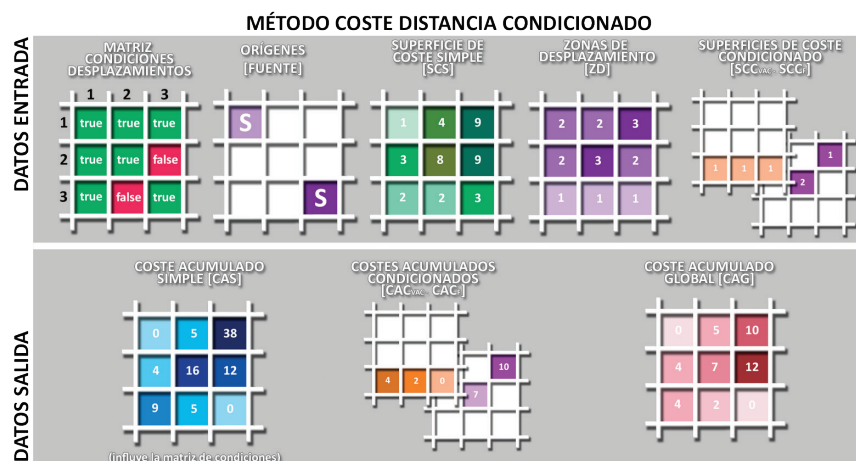


Figura 114. Esquema de datos de entrada y de salida para el algoritmo de Coste Distancia Condicionado.

A continuación se describe el proceso detallado que es necesario realizar para ejecutar el método de cálculo de accesibilidad mediante Coste Distancia Condicionado (CDC). Comenzaremos definiendo las zonas de desplazamiento y la matriz de condiciones de desplazamiento, para seguir con un análisis concreto de los datos geográficos de entrada que requiere el método CDC.

Una vez que se identifican todos los elementos que van a intervenir y condicionar los cálculos, se describe el proceso de cálculo y las diferentes ecuaciones a emplear en las operaciones en función de los condicionamientos que se determinen durante la ejecución del algoritmo CDC. También se detallan los datos de salida que se obtienen, como resultados del proceso de cálculo, al aplicar este algoritmo CDC.

Para comprender mejor el método CDC, se muestra paso a paso, y operación a operación, un ejemplo en el que se propone unos datos de entrada que permitan

comprobar su funcionamiento completo, incluyendo varios EDC. Aunque en los ensayos posteriores sólo se necesita un EDC para caracterizar las infraestructuras viarias, en este ejemplo se propone considerar también la participación de una infraestructura ferroviaria en el cálculo. Salvo en este ejemplo, en general durante toda la descripción del método CDC, consideraremos las infraestructuras viarias como elemento fundamental de los desplazamientos, y por tanto de los planteamientos descritos. Por último, se describe la aplicación desarrollada sobre gvSIG y SEXTANTE para ejecutar este algoritmo CDC, y que permite la ejecución de los ensayos que se mostrarán en el capítulo 5.

5.3.1. Definición de zonas de desplazamiento

El territorio se puede clasificar en diferentes **zonas de desplazamiento** que determinan la facilidad de movimiento de un elemento o fenómeno para recorrer cada lugar geográfico, así como la manera en la que se pueden relacionar estas zonas entre sí. La facilidad en el desplazamiento se entenderá como el coste que supone atravesar el territorio de cada zona. Este coste se representa en este trabajo de investigación como el tiempo empleado en cruzar estas áreas, aunque podrían considerarse también otros tipos de coste como los energéticos, los económicos, o cualquier otro que considere la dificultad que supone pasar por esos lugares.

Podemos definir una **Zona de Desplazamiento (ZD)** como aquellos lugares geográficos que presentan unas características similares propias, que determinan la movilidad sobre ellos. Cada zona tendrá unas condiciones de desplazamiento particulares, por la cuáles se establecerán los costes que supondrá atravesar esas áreas.

Cuando una zona de desplazamiento representa zonas geográficas con características similares en las que se permite un desplazamiento sin restricciones para interactuar con otras zonas, este espacio se considerará **zona de desplazamiento simple**, pues sólo precisa de una zona de desplazamiento. Las celdas que lo representan tendrán, en general, como valor, el tiempo resultante de aplicar la máxima velocidad de desplazamiento posible en ellas, según el



medio de transporte que se utilice. Un ejemplo podría ser el considerar como zona de desplazamiento la red viaria convencional. Las celdas que representan esta red viaria pueden presentar diferente velocidad de desplazamiento en función de las condiciones estructurales de cada carretera. En esta zona no se consideran restricciones de comunicación con otras zonas limítrofes, pues un usuario puede, en principio, detener el vehículo en cualquier punto para moverse a otro área territorial en la que no exista carretera, por lo que podemos considerarla como un espacio de desplazamiento simple.


Si la zona de desplazamiento presenta restricciones intrínsecas en los movimientos que la comunican con las zonas vecinas, será necesario disponer de otra zona que permita su comunicación con el resto del territorio, constituyendo ambas zonas de desplazamiento un espacio compuesto que denominamos **Espacio de Desplazamiento Condicionado (EDC)**. Un EDC permite que puedan coexistir varios tipos de desplazamiento en esos lugares, incluyendo modos de transporte con desplazamiento restringido o con características particulares en su recorrido. Estos espacios de desplazamiento condicionado necesitarán obligatoriamente estar compuestos por al menos dos zonas de desplazamiento: una que representa la **zona de desplazamiento condicionado** que determina el ámbito ocupado por el elemento territorial o el tipo de infraestructura de transporte con limitaciones de acceso o con modos de desplazamiento específicos; y otra zona, definida como **nodo**, para posibilitar la conexión con el resto de espacios de desplazamiento que definen un territorio. Este nodo será la zona geográfica en la que permite transformar un coste acumulado condicional en coste acumulado simple, y viceversa, como explicaremos más adelante.

Estos espacios de desplazamiento condicionado contemplan la posibilidad de compartir modos de transporte en sus zonas condicionadas, así como la superposición de varias zonas en el mismo lugar. Para representar estas circunstancias se precisa de una **Superficie de Costes Condicionados (SCC)** asociada a cada EDC, en donde tendrán valor únicamente aquellas celdas que representen la zona de desplazamiento condicionada, y que pueden permitir, por

lo tanto, varios tipos de desplazamiento en ese lugar. En este caso, el coste condicionado asignado a estas celdas tendrá como valor el correspondiente al del tiempo empleado en el desplazamiento a la máxima velocidad posible para atravesarlas considerando el modo o medio de transporte asociado a ese EDC. En general este coste condicionado será diferente al coste de desplazamiento considerado como normal para esa zona, y que a su vez se recoge en la **Superficie de Costes Simples (SCS)**.

Un ejemplo de espacio de desplazamiento condicionado podría ser la autopista, pues el usuario de la misma sólo podría salir de ella a otros lugares del territorio en los enlaces o en puntos concretos de su trazado. En este caso, el espacio de desplazamiento condicionado estaría formado por la vía de alta capacidad, entendida como zona de desplazamiento condicionado, y por la zona de desplazamiento de los enlaces, que actuarían como nodo de ese espacio compuesto. Para caracterizar la autopista se aplica una velocidad específica para el desplazamiento longitudinal, pero en viaductos o zonas de paso, se permite otro desplazamiento transversal sobre esa infraestructura, en principio con una velocidad muy diferente, que hace referencia a la carretera convencional con la que se cruza a distinto nivel la vía de alta capacidad. Sobre un mismo lugar geográfico en planta tendremos dos zonas de desplazamiento diferentes, y por tanto, dos costes distintos para atravesarlas. Para seguir manteniendo la movilidad de las carreteras convencionales que atraviesan la autopista mediante pasos elevados o subterráneos, deben considerarse en esos lugares unos costes de desplazamiento diferentes, según se circule por la autopista (coste condicionado) o bien por la carretera convencional que la atraviesa (coste simple).

El algoritmo Coste Distancia Condicionado permite tener en cuenta estos pasos, asignando costes condicionados convenientemente a las celdas implicadas dentro de la superficie de costes condicionados asociada al EDC de las autopistas. En esos puntos se obtendrán dos tipos de costes acumulados: uno el coste acumulado simple correspondiente al tránsito por el mismo mediante el viario convencional, y otro el coste acumulado condicionado debido al despla-



zamiento por la autopista. Este coste acumulado condicionado que se calcula en los pasos a distinto nivel y en resto del trazado de la autopista, únicamente se traslada como coste acumulado simple al resto del territorio en las zonas caracterizadas como Nodo de ese espacio de desplazamiento condicionado. De esta forma, se evita que este coste acumulado condicionado influya en los cálculos fuera de esta infraestructura de alta capacidad o altas prestaciones, salvo en los enlaces. Con este procedimiento se intentan responder al comportamiento real de los desplazamientos en este tipo de viario.

Aunque no haga referencia directa a las infraestructuras viarias, objeto de este estudio, podemos encontrar en las vías de ferrocarril otro ejemplo para aclarar el concepto de espacio de desplazamiento condicionado, y que este modelo CDC propone. En este tipo de zona de desplazamiento sólo se permite que el usuario del tren pueda salir de ella en las estaciones, apeaderos o lugares específicos del recorrido. Por tanto, el espacio de desplazamiento del ferrocarril será un espacio compuesto por una zona de desplazamiento condicionado que representan las vías, y otra zona de desplazamiento que define las estaciones o apeaderos, que será el nodo de ese espacio. Sobre las vías, además del paso de trenes es posible realizar, aunque no recomendable, desplazamientos para atravesarlas a pie o en automóviles en cruces puntuales a nivel, con lo que las celdas que definen el trazado del ferrocarril deben disponer de dos costes de desplazamiento diferentes, el condicionado generado por la movilidad en tren y el que representa al desplazamiento genérico sobre el territorio. El coste acumulado condicionado correspondiente al transporte por las vías de ferrocarril sólo puede trasladarse al coste acumulado simple del resto del territorio en los nodos que definen las estaciones.

En definitiva, el algoritmo propuesto plantea un territorio que puede dividirse en diferentes espacios de desplazamiento simples o compuestos, formados por zonas caracterizadas por los modos de desplazamiento que en ellas se establezcan. Algunos de estos modos pueden presentar restricciones en el movimiento, por lo que se establecen espacios de desplazamiento condicionado que contemplan la existencia de algún ámbito territorial concreto don-

de coexisten de forma superpuesta varios tipos de movilidad. Estos espacios condicionados necesitan de nodos de conexión donde las restricciones de movimiento desaparecen, o se suavizan, para permitir su comunicación con el resto del territorio.

La definición de las zonas de desplazamiento debe realizarse previamente a la ejecución del algoritmo, con la finalidad de caracterizar adecuadamente las restricciones y funcionalidades que presentarán en el proceso de cálculo. Su ubicación sobre el territorio se asignará mediante un archivo ráster específico, en el que se diferencien todas las zonas que se utilizarán en el algoritmo.

5.3.1.1. Establecimiento de las zonas de desplazamiento para el análisis de las infraestructuras viarias en la accesibilidad territorial

El modelo de accesibilidad de Coste Distancia Condicionado precisa identificar las zonas de desplazamiento que van a ser tenidas en cuenta durante el desarrollo de las operaciones de cálculo definidas en el algoritmo. Para el análisis propuesto en esta investigación centrada en el análisis de la participación de las infraestructuras viarias en la accesibilidad territorial, vamos a definir un único Espacio de Desplazamiento Condicionado (EDC) que considere la movilidad de las vías de alta capacidad, como vertebradoras principales de las comunicaciones de una región.

El EDC en este caso representará a las vías de alta capacidad o altas prestaciones, identificadas como autovías, autopistas o cualquier tipo de infraestructura viaria que tenga limitaciones de acceso lateral, y su comunicación con el resto de la red viaria sólo se produzca en enlaces puntuales debidamente tratados. En ese EDC, que denominaremos “VAC”, se identificarán dos zonas de desplazamiento que definirán por un lado el trazado de estas infraestructuras (mediante una zona denominada “Autopista”), y por otro, la conexión de esas vías con el resto del territorio (a través de una zona denominada “Enlace”, que será el Nodo de ese EDC). Este EDC tendrá asociada una Superficie de Costes Condicionados (SCC_VAC, superficie vinculada a las Vías de Alta Capacidad) que permitirá realizar los cálculos necesarios de este algoritmo, junto con la



Superficie de Costes Simples (SCS) que definirá los desplazamientos, a priori, sin restricciones de movimientos por el resto del territorio.

Se necesitarán por tanto otras zonas que definan esos espacios fuera de las VAC, y que en este caso completaremos mediante dos zonas de desplazamiento. Una de ellas, denominada “Carretera”, coincidirá con la red de carreteras convencionales que complementa a las infraestructuras viarias anteriores. La otra zona, que llamaremos “Terreno”, corresponde con la mayor parte del ámbito geográfico a estudiar, pues define el resto del terreno por el que se puede transitar libremente. Los costes de desplazamiento en estas dos zonas se recogerán en la SCS a emplear en el algoritmo.

Podría subdividirse en muchas más zonas específicas cada una de las consideradas, lo que establecería muchos más tipos de modelos de desplazamiento sobre el territorio, en función de las necesidades de los análisis, incorporando si fuese preciso nuevos espacios de desplazamiento condicionado o simplemente nuevas zonas de desplazamiento simple. Sin embargo, a efectos de comprobación del modelo, las zonas planteadas son suficientemente representativas.

De igual forma, las VAC podrían ser representadas por diferentes EDC para tener en cuenta la existencia en el mismo ámbito de distintas tipologías, funcionalidades o características diferentes de los enlaces. Con ello podríamos modelizar cada situación del viario para definir adecuadamente su comportamiento en el proceso de cálculo a realizar. Incluso podríamos plantear subdivisiones de las VAC en zonas diferentes para cada calzada, o tramificarlas empleando diferentes zonas de enlace para intentar modelizar las restricciones de giro en cada nodo. En todo caso, se deja para futuros estudios este análisis más laborioso de identificación de zonas, centrándonos ahora en la validez del nuevo modelo de Coste Distancia Condicionado propuesto.

La caracterización y parametrización de cada una de estas zonas de desplazamiento establecidas, determinará en gran medida la veracidad de los resultados del proceso, independientemente del nivel de desagregación empleado, aunque cuanto mayor sea, en principio más precisión se podría alcanzar en

el análisis. Otro aspecto importante para este algoritmo con respecto a las zonas de desplazamiento serán las restricciones de movilidad que se asignen entre ellas, y que en el próximo apartado concretaremos mediante la Matriz de Condiciones de Desplazamientos. Según como sean los permisos que se propongan para las comunicaciones entre las zonas, la definición geométrica de estos lugares debe ser cuidadosamente elaborada evitando que se produzcan restricciones de movilidad donde no las hay, debidas fundamentalmente a la superposición puntual o parcial de zonas que presentan ciertas restricciones entre sí.

Como regla general puede admitirse que se debe mantener la continuidad de las zonas de desplazamiento simple, es decir que no forman parte de un Espacio de Desplazamiento Condicionado (EDC), para asegurar el cálculo del Coste Acumulado Simple (CAS) en ellas sin ningún tipo de interrupción por un corte ficticio. También es importante garantizar que las zonas que representen nodos de conexión de un EDC, consigan comunicar adecuadamente ese EDC con el resto de zonas del territorio. Para ello el área que representa una zona Nodo como un elemento individual debidamente localizado, debe contactar con la zona de desplazamiento condicionado de ese EDC y también con alguna zona que no pertenezca a ese EDC, y con la que tenga compatibilidad de desplazamiento, evitando así en la medida de lo posible que se creen zonas aisladas del cálculo.

Para que el modelo funcione debe establecerse el lugar geográfico de estas zonas, así como la ubicación de los lugares que generan los desplazamientos sobre el territorio, bien por considerarse origen de los mismos, bien por considerarse destino de los movimientos. La definición geográfica de las zonas de desplazamiento y la de los lugares fuente de desplazamientos serán dos archivos diferentes para el modelo planteado. Estos lugares que ejercen de fuente de los desplazamientos, serán también unas zonas cruciales para la ejecución del Modelo de Accesibilidad, pues iniciarán el proceso de cálculo del algoritmo. Se recogen en un archivo independiente en el que se determina la ubicación de esos puntos origen o destino de los movimientos, y que coinci-

dirán geográficamente con cualquier zona de desplazamiento de las anteriormente definidas. Podrá corresponder con una o con varias de esas zonas, en función del número y la forma geométrica de esos lugares “fuente” o lugares “origen-destino”.

5.3.2. Definición de la Matriz de Condiciones de Desplazamientos

Uno de los aspectos más singulares del algoritmo planteado se basa en el establecimiento de condiciones que activen o desactiven la posibilidad de ejecutar el algoritmo en función de las zonas que se comuniquen. En el SIG basado en el modelo ráster es habitual establecer geoprocesamientos que operan de forma iterativa¹²⁸ desde una celda a las celdas vecinas, recorriendo todo el ámbito de estudio. Establecer previamente unas zonas que clasifiquen el territorio, y definir sobre ellas las restricciones que permitan o prohíban que esa operación geoespacial, pueda o no calcularse en función del origen y del destino de la conexión que se establezca, abre nuevos horizontes de posibilidades en los análisis geoespaciales.

Convenientemente estudiado el caso, podría plantearse no solo que se restrinja o permita la ejecución de un algoritmo, sino que se ejecute una operación u otra diferente en función de cuáles sean las zonas origen y destino. Es decir, según estas celdas pertenezcan a zonas que presenten unas características previas que hagan recomendable tratamientos distintos en las operaciones, pero que puedan integrarse durante el mismo proceso de cálculo. Además el modelo permite operar de forma distinta entre dos zonas, según quién sea la zona origen y quién la zona destino, pudiendo realizar operaciones diferentes entre ellas en función de dónde a dónde se produzca el sentido del desplazamiento.

El establecimiento de condiciones entre las zonas podría no sólo indicar la posibilidad de comunicación entre dos lugares, sino también implicar un coste añadido a ese tránsito. De esta forma se penalizaría o se favorecería el

¹²⁸ Por ejemplo algoritmo para el cálculo de medidas centrográficas, clasificación no supervisada, distancia mínima iterativa, método ISODATA, cálculo de direcciones de flujo, etc.

desplazamiento entre zonas específicas, lo cual podría recogerse mediante un factor numérico que se aplicaría sobre el coste de atravesar esas celdas, o bien simplemente un valor que se suma al coste calculado en ese desplazamiento. Un ejemplo posible sería el hecho de pasar de un desplazamiento por carretera a uno por el terreno, puesto que es necesario aparcar el coche antes de salir a caminar, por lo que se penalizaría ese tiempo aumentando el coste calculado por atravesar la celda de la carretera y la celda de terreno vecina.

En el caso de este trabajo, el planteamiento de fijar restricciones en la comunicación entre las celdas se desarrolla mediante una **Matriz de Condiciones de Desplazamientos**. En esta matriz se ordenan en filas y columnas los diferentes tipos de zonas de desplazamiento admitidos en el análisis, y establece si se permite o se prohíbe el desplazamiento entre cada par de zonas, para calcular el Coste Acumulado Simple (CAS) dentro del modelo Coste Distancia Condicionado (CDC). Las restricciones que se impongan en esta Matriz de Condiciones de Desplazamientos afectarán únicamente a las operaciones que se realicen sobre la Superficie de Costes Simples (SCS), y que se almacenan en el CAS.

Podría pensarse en usar una matriz similar para el cálculo de los Costes Acumulados Condicionados (CAC), pero si la Superficie de Costes Condicionados (SCC) está debidamente elaborada, sería innecesario ese control de restricciones, pues únicamente se podría calcular el CAC en las celdas con valor en SCC, que normalmente pertenecerán a las zonas del Espacio de Desplazamiento Condicionado correspondiente, por lo que los lugares con los que no se debería establecer el cálculo, ya estarían identificados con los valores nulos de las celdas de ese archivo SCC.

Caso distinto es la operatividad con la Superficie de Costes Simples (SCS) pues prácticamente todas las celdas de ese archivo ráster presentan valor no nulo. En el caso de existir alguna celda de valor nulo, afectaría a zonas muy localizadas y poco significativas comparadas con la totalidad de las celdas que presentan valor no nulo. La Matriz de Condiciones de Desplazamientos cobra



extraordinaria importancia en esta circunstancia, pues limita los cálculos de los desplazamientos entre las celdas de ciertas zonas, aunque ambas celdas tengan valor de coste en la SCS.

En el análisis de las infraestructuras viarias en la accesibilidad territorial, empleando adecuadamente la Matriz de Condiciones de Desplazamiento podemos imponer que las celdas que representan una autopista no puedan comunicarse con las celdas vecinas a no ser que éstas pertenezcan a la zona identificada como Nodo del Espacio de Desplazamiento Condicionado que define a las vías de alta capacidad. Esta matriz permitirá identificar si para realizar el cálculo de Costes Acumulados Simples durante el desplazamiento, podemos pasar de una celda a otra, en función del valor que se establezca en la matriz, para la relación entre cada una de las zonas a las que pertenecen la celda origen y la celda destino.

En el caso de que la relación entre el valor de la zona de celda origen y la zona de la celda destino sea “TRUE” podrá realizarse el cálculo puesto que esta comunicación está permitida. Si por el contrario la relación entre las zonas de las celdas origen y destino tiene valor “FALSE”, no podrá realizarse el cálculo del coste pues no estará permitido el desplazamiento entre ellas. En el apartado 5.3.3.1, podemos ver un ejemplo concreto.

5.3.3. Datos geográficos de entrada para la ejecución del modelo de accesibilidad territorial de Coste Distancia Condicionado

Un Sistema de Información Geográfica precisa de datos geográficos que le permitan desarrollar todas las potencialidades de cálculo y manejo de esta información que estos sistemas poseen. El algoritmo del Coste Distancia Condicionado se basa en la capacidad de procesamiento geoespacial de los SIG ráster, por lo que precisa incorporar datos geográficos para comenzar a ejecutarse. Como ya hemos comentado, los datos de entrada en este modelo necesitan incorporar más información que la demandada en el modelo Coste Distancia conocido. Recordamos que para ejecutar ese algoritmo se requería disponer de un archivo que marcara los lugares fuente o genera-

dores de los desplazamientos, y un archivo ráster que representase la superficie de fricción o de costes asociada a los desplazamientos en cada punto del ámbito de estudio.

En el algoritmo de Coste Distancia Condicionado que se propone, son precisos los siguientes tipos de datos de entrada:

- Zonas de Desplazamiento (ZD): archivo ráster que recoge los diferentes tipos de zonas por las que se podrán establecer desplazamientos específicos.
- Lugares fuente de los desplazamientos (FD): archivo ráster donde se especifica con valor “0” las celdas que serán tenidas en cuenta para generar los desplazamientos y por tanto para iniciar el proceso de cálculo en el algoritmo.
- Superficie de Costes Simples (SCS): archivo ráster que representa el coste que se invierte en atravesar cada una de las celdas pertenecientes a las zonas de desplazamiento definidas.
- Superficies de Costes Condicionados (SCCi): conjunto de archivos ráster, tantos como Espacios de Desplazamientos Condicionados se definan en el modelo, que representarán los costes que implica atravesar cada una de las celdas específicas que identifican las zonas de desplazamiento condicionado.

A continuación desarrollaremos las particularidades que definen a cada uno de estos tipos de datos necesarios para ejecutar este algoritmo.

5.3.3.1. Definición geográfica de las Zonas de Desplazamiento para el análisis de las infraestructuras viarias en la accesibilidad territorial

Como hemos indicado en el apartado 5.3.1.1, las zonas fundamentales que vamos a considerar en el análisis de las infraestructuras viarias en la accesibilidad territorial, serán: el terreno, las carreteras convencionales, las autopistas y los enlaces de estas. Para definir adecuadamente cada una de las zonas de desplazamiento, atenderemos al valor numérico que la caracteriza (o clase),

identificando si esa zona pertenece o no a algún Espacio de Desplazamiento Condicionado (asociado por tanto, a una Superficie de Coste Condicionado), y en ese caso, si la zona se puede considerar o no, nodo de ese EDC. Adicionalmente podría vincularse un texto nominativo a cada zona, para su identificación más eficiente.

Para este análisis podemos considerar la caracterización de zonas recogida en Tabla 25, donde se definen los parámetros principales que las identifican.

Tabla 25. Ejemplo de definición de las zonas de desplazamiento para el análisis de las infraestructuras viarias en la accesibilidad territorial mediante el modelo de Coste Distancia Condicionado.

DEFINICIÓN DE ZONAS DE DESPLAZAMIENTO			
CLASE	NOMBRE	EDC_SUPERFICIE DE COSTE CONDICIONADO	NODO DE EDC
1	Terreno	NULL	FALSE
2	Carretera	NULL	FALSE
3	Autopista	SCC_VAC (archivo ráster de superficie de coste condicionado asociado a ese EDC)	FALSE
4	Enlace	SCC_VAC (archivo ráster de superficie de coste condicionado a ese EDC)	TRUE

En el caso planteado en esta memoria, las restricciones de comunicación se establecen principalmente entre la autopista (zona 3, en este ejemplo) con el terreno (zona 1) y el viario convencional (zona 2), puesto que desde la autopista no podrá accederse libremente al terreno que la limita ni a cualquier carretera de su entorno. Por el contrario, en principio desde la autopista podría desplazarse dentro de ella misma (zona 3) y también acceder a los enlaces existentes (zona 4) que permitirá conectarla con otros viarios. La zona 4 por tanto actuará en este ejemplo como nodo del EDC compuesto por la autopista (zona 3) y los enlaces (zona4).

Sin embargo en este caso, vamos a restringir los movimientos de la autopista con todas las zonas, incluido ella misma¹²⁹, puesto que no nos interesará calcu-

¹²⁹ En el caso de que se quisiese mantener los permisos en los desplazamientos dentro de la zona 3 y entre la zona 3 y la 4, tampoco habría ningún inconveniente, pues no influirían en los cálculos finales siempre que el coste simple para atravesar la autopista fuese igual o más ele-

lar el Coste Acumulado Simple (CAS) en esta zona, sino que sólo atenderemos en esta infraestructura al Coste Acumulado Condicionado (CAC). Es conveniente recordar que la Matriz de Condiciones de Desplazamientos sólo establece las restricciones para el cálculo del CAS, por lo que en las operaciones para obtener el CAC no se atienden estos condicionantes de comunicación entre zonas.

Para dar mayor realismo al comportamiento de los desplazamientos, aunque el enlace de la autopista sea el nodo del espacio de desplazamiento condicionado que definen, consideramos que no se podrá pasar directamente desde el enlace al terreno, sin pasar previamente por una carretera, por lo que también restringimos los desplazamientos entre las zonas 1 y 4. El sentido de los desplazamientos en este caso no serán tenidos en consideración, por lo que tendremos una matriz simétrica (Tabla 26).

Tabla 26. Ejemplo de Matriz de Condiciones de Desplazamiento para el cálculo del Coste Acumulado Simple en el análisis viario de la accesibilidad territorial mediante el modelo de Coste Distancia Condicionado.

Origen\Destino	1	2	3	4
1	TRUE	TRUE	FALSE	FALSE
2	TRUE	TRUE	FALSE	TRUE
3	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
4	FALSE	TRUE	FALSE	TRUE

Una vez que tenemos definidos los tipos de zonas de desplazamiento que se tendrán en cuenta en el análisis, y las restricciones de comunicación entre ellos, es preciso ubicar geográficamente estas zonas en el territorio a analizar. Para ello se definirá un archivo ráster en el que a cada celda se le asignará como valor, el correspondiente a la clase de la zona de desplazamiento a la que pertenece. Cada celda¹³⁰ únicamente podrá pertenecer a una zona, por lo

vado que el coste condicionado, como sería lo normal. El único inconveniente en este caso, sería el aumento del tiempo de cálculo del proceso para atender a las nuevas operaciones a realizar.

¹³⁰ Generalmente la resolución de las celdas para representar las infraestructuras viarias en las referencias consultadas, suelen optar por tamaños de entre 100 y 500 metros, aunque hemos encontrado ejemplos que llegan a considerar más de un kilómetro. Normalmente estos estu-



que este proceso requiere de cierto cuidado para evitar que las restricciones establecidas en la Matriz de Condiciones de Desplazamiento, impidan movimientos que en realidad debieran realizarse.

Por ejemplo, si consideramos un paso a distinto nivel entre una autopista y una carretera convencional, habrá al menos una celda que represente en planta la ubicación de ese lugar, y por tanto podría pertenecer a cualquiera de ambas zonas. Para evitar cálculos de costes de desplazamiento incorrectos, la zona de la autopista y la zona de la carretera deben tener prohibido los desplazamientos entre ellas en la Matriz de Condiciones que se defina. Si la celda de ese lugar común se representa como perteneciente a la autopista, se generaría un error en el cálculo del Coste Acumulado Simple (CAS) pues se impediría el tránsito continuo por la carretera (Figura 115). Si por el contrario la celda se define como zona de la carretera convencional, se podría calcular el CAS a lo largo del trazado de esta vía a su paso sobre la autopista (Figura 116).

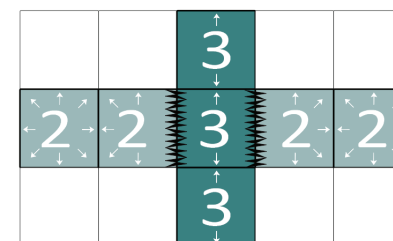


Figura 115. Esquema de la representación de un paso a distinto nivel sobre la autopista, considerando este paso como perteneciente a la autopista. Movimientos permitidos para el cálculo del CAS. En este ejemplo, la autopista se representa con valor 3 y la carretera convencional con valor 2. La autopista en este caso no permite la continuidad de recorrido por la carretera convencional.

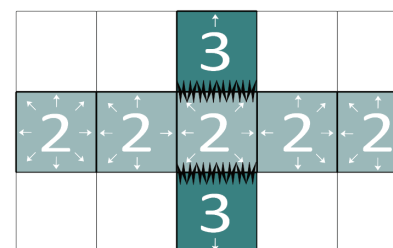


Figura 116. Esquema de la representación de un paso a distinto nivel sobre la autopista, considerando este paso como perteneciente a la carretera convencional. Movimientos permitidos para el cálculo del CAS. En este ejemplo, la autopista se representa con valor 3 y la carretera convencional con valor 2. La carretera convencional mantiene su continuidad.

dios no atienden a viarios secundarios, y sólo consideran grandes infraestructuras de comunicación. Una vez que se toma la opción de una resolución para el viario, todos los demás elementos territoriales que se consideren deben tener la misma resolución.

En los ensayos y experimentos desarrollados durante la presente investigación hemos considerado diferentes tamaños de celda, entre los 20 cm y 2 metros, como casos de análisis en entornos geográficos reducidos, a celdas de 25 metros, 100 metros o 500 metros para ámbitos territoriales mayores.

Un tamaño de 25 metros representa con cierta fiabilidad el tamaño real que ocupan las vías de alta capacidad, o vías primarias con más de dos carriles. Para tamaños mayores, la simplificación hace que se considere como viario zonas que realmente no lo son, llegando a unirse unas carreteras con otras cuando en realidad no están comunicadas directamente, o lo están en cruces ubicados en otros lugares.

Esta repercusión de las dimensiones de las celdas se verá con más detenimiento en el análisis de los resultados de los ensayos realizados en esta investigación.

Para evitar problemas de este tipo debe construirse el fichero de zonas de desplazamiento mediante la superposición ordenada de varios archivos ráster, en el que a medida que una celda se solapa por un nuevo archivo, se queda con el valor del último archivo integrado.

Para el análisis de las infraestructuras viarias en la accesibilidad territorial que queremos realizar con el Modelo de Coste Distancia Condicionado, emplearemos como primer archivo el correspondiente al Terreno, que nos marcará además todo el ámbito geográfico que se analizará, clasificado como zona 1. Sobre ese archivo se establecerá seguidamente la zona que representa los trazados de las autopistas consideradas, con lo que cambiará el valor de las celdas del terreno superpuestas con las autopistas, para considerarse ahora como zona

3. Seguidamente se añaden las carreteras convencionales, que cambiarán a la zona 2 el valor de las celdas por donde pasa su trazado. Así conseguiremos que los pasos a distinto nivel sobre las VAC mantengan la consideración de viario convencional y se eviten cortes en sus recorridos. Por último se integrarán los enlaces correspondientes a la zona 4, que quedarán por encima de cualquier otra zona definida, para conseguir que funcionen adecuadamente como nodo del espacio de desplazamiento condicionado de las autopistas. De esta forma conseguimos que todo el ámbito de estudio esté considerado pues con la zona del terreno se completa toda la región de análisis; que todas las carreteras de la red convencional que dispongan de un paso a distinto nivel con respecto a la autopista, mantengan la continuidad de su trazado; y que los enlaces ocupen una posición que garantice la conexión entre la autopista y otras zonas de desplazamiento.

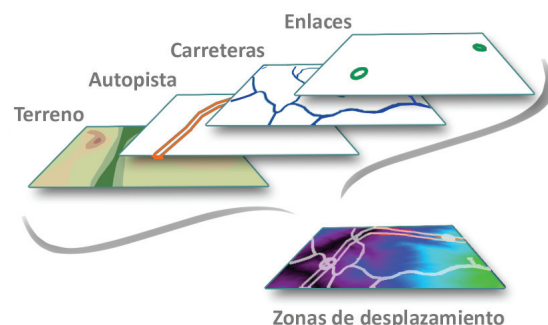


Figura 117. Orden de capas para la definición de las Zonas de Desplazamiento para el análisis de las infraestructuras viarias en la accesibilidad territorial mediante el Modelo de Coste Distancia Condicionado.

5.3.3.2. Definición geográfica de los lugares fuente de desplazamientos

Como dato de entrada del Modelo Coste Distancia Condicionado, además de la definición de las Zonas de Desplazamiento, es preciso indicar los lugares que actuarán como inicio de las operaciones de cálculo de los costes de desplazamiento que se establecen en el algoritmo propuesto, al igual que se requería en el modelo de Coste Distancia.

Puesto que el coste considerado en este modelo es isotrópico, estos puntos podrían considerarse como los orígenes o como los destinos de los desplazamientos. Estos lugares “origen-destino” o lugares “fuente” de desplazamiento se definirán en un nuevo archivo ráster independiente, en el que estas celdas “fuente” tendrán valor distinto de nulo. Para que las operaciones posteriores sean factibles, las celdas fuente deberán ocupar geográficamente cualquiera de las celdas que se definen en el archivo de Zonas de Desplazamiento.

A todos los efectos del algoritmo, estos puntos “origen-destino” se comportarán como una nueva zona de desplazamiento en la que se podrá desplazar a cualquier otra zona, sin ningún tipo de restricción. Esta condición implica que aunque el punto fuente esté ubicado sobre una zona que tenga prohibida la comunicación con una zona vecina, esa restricción no será aplicable en la celda “origen-destino” del modelo. Esta supresión de restricciones sólo se produce en las celdas fuente, por lo que en cuanto se salga de ellas se activa de nuevo la Matriz de Condiciones de Desplazamiento.

Considerar todos los desplazamientos admisibles en las celdas fuente, da seguridad al modelo pues aseguramos que siempre se podrá iniciar el algoritmo, y eliminamos las consecuencias que tendrían posibles fallos de precisión en la localización en las celdas “origen-destino”, si se situasen por error en zonas con restricciones.

5.3.3.4. Definición de la Superficie de Costes Simples

De igual forma que se necesitaba en el algoritmo Coste Distancia, el algoritmo Coste Distancia Condicionado precisa de un archivo ráster en el que se establezca el coste que supone atravesar cada una de las celdas que definen el territorio a analizar. La Superficie de Costes Simples (SCS) representará la fricción que ofrecerá cada celda del ámbito de estudio a los desplazamientos que se ejecuten sobre ella en función de las características que definan a cada espacio y al tipo de desplazamiento que se considere.

En el caso que estamos considerando los espacios de desplazamiento que contribuyen a la SCS serán:



- Terreno: se establece un coste de tiempo en atravesar cada celda de este espacio de desplazamiento, en función de la velocidad de recorrido a pie sobre el territorio en general, asignada a partir de la pendiente máxima de cada lugar que es obtenida gracias a un Modelo Digital del Terreno del ámbito de estudio.
- Carretera: se establece un coste de tiempo en atravesar cada celda de los trazados que configuran la red viaria convencional que representa este espacio de desplazamiento. Ese coste se calcula a partir de la velocidad que se especifica a cada viario en función de sus características técnicas.
- Enlace: se establece un coste de tiempo en atravesar cada celda de los trazados que configuran los ramales de enlace entre el viario convencional y las VAC, a partir de la velocidad específica que se asigna a este espacio de desplazamiento.

El espacio de desplazamiento de la Autopista no se considera para la obtención de esta superficie de costes simple, pues tendrá un tratamiento diferenciado.

5.3.3.4. Definición de las Superficies de Costes Condicionados

Además de la SCS, el algoritmo de Coste Distancia Condicionado requiere que cada Espacio de Desplazamiento Condicionado (EDC) defina además una Superficie de Costes Condicionados (SCC) propia que identifique claramente la fricción característica que ejerce ese espacio sobre los desplazamientos del territorio considerado. Los valores de las celdas de una SCC serán en general diferentes a los valores de las mismas celdas en la SCS con lo que en estos lugares se dispondrá de dos costes de desplazamientos diferentes, y por tanto se podrá calcular en ellas al menos dos costes acumulados distintos, como veremos más adelante en la explicación del proceso de cálculo.

En el caso que se está considerando en esta memoria, la Autopista representa un EDC, por lo que el trazado de las Vías de Alta Capacidad presentes en la región de análisis, deberá definir la SCC a partir de los costes de desplazamiento

que se obtengan según la velocidad asignada a los vehículos que circulen por cada tramo de estos viarios. En este caso, la SCC tendrá valor únicamente en las celdas que representen el trazado de las VAC, quedando el resto de celdas con valor nulo o sin dato. Puesto que la velocidad en las VAC suele ser más alta que en el resto del viario, en general, los costes de tiempo asignado a la SCC para atravesar estas celdas, serán menores a los costes que tengan esas mismas celdas en la SCS.

5.3.4. Proceso de cálculo del modelo Coste Distancia Condicionado para el análisis de la accesibilidad territorial

Una vez que tenemos definido todos los datos de entrada precisos para ejecutar el algoritmo, se procede al cálculo de los costes acumulados atendiendo a las condiciones de desplazamiento establecidas, y siguiendo un proceso matemático similar al especificado en el algoritmo Coste Distancia, aunque incluyendo una serie de condiciones y comprobaciones que variarán la forma en la que se ejecuta este cálculo para hacerlo más versátil.

El proceso de cálculo comienza a partir de las celdas fuente de desplazamientos que se establecen en el archivo ráster correspondiente. Las operaciones planteadas se establecen siempre entre dos celdas, la celda origen (O) y cualquiera de las ocho celdas destino (D) que rodean a celda origen, y hacia las que se puede desplazar desde O (Figura 118). El cálculo se realiza de forma iterativa hasta que se completen todas las celdas consideradas en el análisis, de forma que presenten los menores valores de coste acumulado posibles para los desplazamientos admisibles en el proceso.

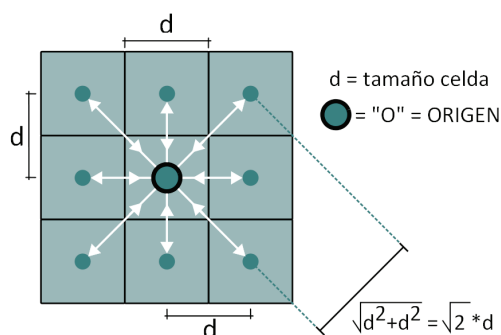


Figura 118. Desplazamientos admisibles desde una celda origen a las celdas destino que la rodean.

La celda origen posee un valor mínimo de coste acumulado, que permite iniciar la operación hacia la celda destino para calcular su coste acumulado en función de los siguientes aspectos:

- Coste acumulado que tenga la celda origen (en el caso de ser celda fuente, este será cero, pues aún no se habrá acumulado ningún coste de desplazamiento). A medida que se van atravesando celdas, se van acumulando los costes que se han invertido en ese desplazamiento, de forma que cruzar la celda destino aumentará el coste acumulado previo.
- Distancia geométrica que separa los centros de ambas celdas. Para archivos ráster basados en celdas cuadradas, como es el caso general, la distancia en desplazamientos horizontales y verticales será la dimensión del lado de la celda, y para los desplazamientos diagonales, esa distancia será la diagonal de la cuadrícula.
- Costes asociados a los desplazamientos a través de las dos celdas, indicados en las superficies de costes correspondientes, tanto para los costes simples como para los costes condicionados.
- Condiciones previas establecidas en las zonas de desplazamiento a las que pertenecen las celdas, según su pertenencia a Espacios de Desplazamiento Condicionado, y considerando las restricciones que

se recogen en la Matriz de Condiciones de Desplazamiento para el cálculo del Coste Acumulado Simple.

A medida que se va calculando el coste acumulado en una celda, esta adquiere la condición de **celda activa**, mientras que hasta entonces se considera en el proceso de cálculo como **celda latente**. Los costes acumulados que se van calculando sobre las nuevas celdas activas, se almacenan en la Lista de Costes Acumulados correspondiente, dependiendo si es un Coste Acumulado Simple (CAS) o un Coste Acumulado Condicionado (CAC). La lista del CAS existirá siempre, y además habrá una lista del CAC asociada a cada Espacio de Desplazamiento Condicionado (EDC), al igual que existía una Superficie de Coste Condicionado vinculada a cada EDC.

Durante el proceso de cálculo, cuando una celda presenta el menor valor de coste acumulado de todos los calculados y almacenados en las Listas de Costes Acumulados existentes (independientemente de la lista en la que se encuentre), esa celda activa adquiere la condición de **celda cerrada**, y su valor y posición se asigna al archivo ráster que recoge el resultado final del coste acumulado correspondiente, bien CAS o bien CAC.

A partir de esa nueva celda cerrada se calculan los costes acumulados en las celdas contiguas a ella (salvo aquellas celdas cerradas también), cumpliendo las condiciones de desplazamiento marcadas, obteniendo un valor de coste acumulado en las celdas que aún no lo tuviesen, o cambiándolo cuando el nuevo coste acumulado calculado fuese menor al existente en la celda destino. Estos nuevos valores de los costes acumulados serán simples o condicionados según se cumplan los criterios operativos del algoritmo (que expondremos seguidamente), almacenando su valor en la Lista de Costes Acumulados que corresponda, junto con los demás valores CAS o CAC calculados hasta ese momento del proceso.

Este proceso continuará de forma iterativa hasta dotar a todas las celdas de la condición de "celdas cerradas", es decir, obtener en cada celda el menor valor de coste acumulado posible ajustado a los requerimientos de cálculo que el modelo de Coste Distancia Condicionado establece. El Coste Acumulado Sim-



ple (CAS) obtiene valor en prácticamente todas las celdas evaluables (salvo las definidas como sin valor o “NoData” en la Superficie de Costes, o las que impongan restricciones completas para alguna zona de desplazamiento). Por su parte los Costes Acumulados Condicionados (CAC) sólo tendrán valor en las celdas donde las Superficies de Costes Condicionadas (SCC) asociadas al mismo Espacio de Desplazamiento Condicionado, tengan valor.

La operatividad de los cálculos será diferente si la celda origen (O) tiene como valor mínimo el CAS o el CAC. Cualquiera que sea el valor mínimo iniciará el proceso operativo del algoritmo, pero según sea CAS o CAC el mínimo de todos los costes acumulados que se hayan calculado hasta ese momento, y estén almacenados en las Listas de Costes Acumulados, las operaciones a realizar variarán.

En el caso de que la celda O tenga un valor mínimo en el CAS (CAS_{min}), lo primero que comprobamos es si la celda destino (D) tiene valor en alguna SCC. En caso afirmativo, se analiza si la celda O pertenece a una Zona de Desplazamiento (ZD) definida como Nodo del Espacio de Desplazamiento Condicionado específico (EDC_i) para esa SCC_i . Si así lo fuese, O tiene la capacidad de dotar de CAC a la celda D, por lo que se calcula mediante la fórmula:

Ecuación 29

$$CAC_{iD} = CAS_O + d \cdot (CS_O + CC_{iD})$$

donde,

CAC_{iD} es el Coste Acumulado Condicionado del EDC_i para la celda destino D

CAS_O es el Coste Acumulado Simple de la celda origen O

d es la distancia geométrica entre la celda O y la celda D

CS_O es el Coste Simple asociado a la celda O dentro de la Superficie de Costes Simples (SCS)

CC_{iD} es el Coste Condicionado asociado a la celda D dentro de la SCC_i

Seguidamente se haría la misma comprobación que es necesario realizar en el caso de que D no tuviese valor en algún SCC_i , o si la celda origen no perteneciese a una zona de desplazamiento considerada como Nodo. En estos

casos se comprueba en la Matriz de Condiciones de Desplazamiento (MCD) si las zonas de O y de D son compatibles. En el caso de que se permita la comunicación entre ambas zonas se calcula el CAS de la celda destino mediante la fórmula:

Ecuación 30

$$CAS_D = CAS_O + d \cdot (CS_O + CS_D)$$

donde,

CAS_D es el Coste Acumulado Simple de la celda destino D

CS_D es el Coste Simple asociado a la celda D dentro de la SCS

Tanto tras ejecutar la Ecuación 30, como en el caso de que las zonas no fuesen compatibles, en donde no estaría permitido calcular el coste acumulado simple entre ellas, se verificaría si la celda destino D tuviese valor en otra Superficie de Costes Condicionados diferente a la ya comprobada. En caso afirmativo para cada valor de la celda en una SCC_j , se repetiría todo este proceso. Si D no tuviese valor en más SCC_j , se buscaría una nueva celda destino D para la celda origen O considerada. En cuanto se hubiese operado con todas las celdas D posibles alrededor de O, se buscaría una nueva celda origen asociada al menor valor de los costes acumulados ya calculados.

En todo caso, si la celda destino corresponde con una celda definida como “fuente”, entonces no se calcula el coste, pues esas celdas inician el procedimiento de cálculo y contarán siempre por tanto, con valor cero para su coste acumulado. Todo este proceso se puede apreciar en la Figura 119.

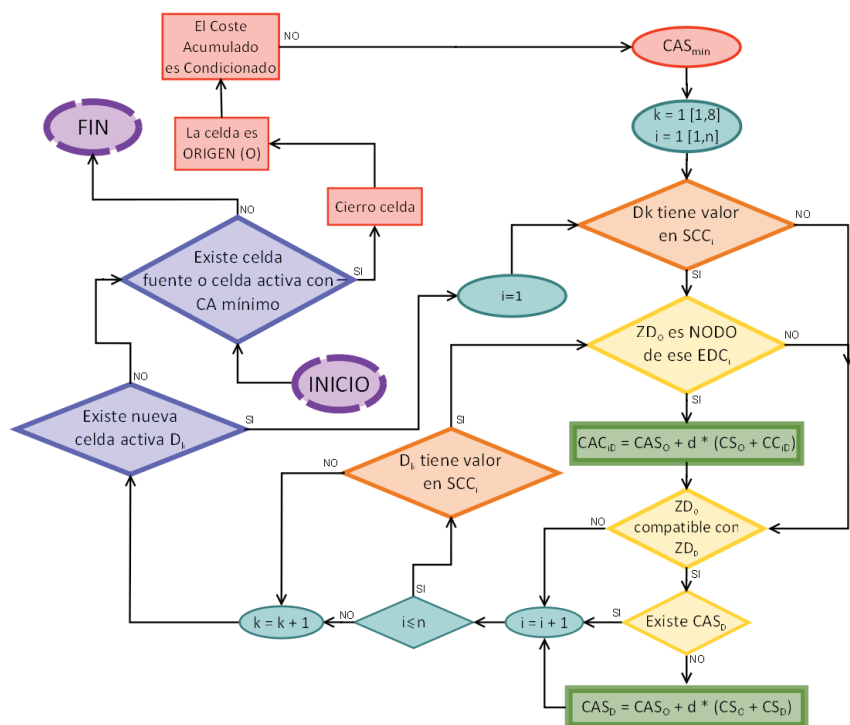


Figura 119. Esquema de cálculo del algoritmo Coste Distancia Condicionado cuando la celda origen presenta un Coste Acumulado Simple mínimo (CAS_{min}).

Si el coste acumulado mínimo calculado y almacenado en las Listas de Costes Acumulados corresponde con el Coste Acumulado Condicionado de alguno de los Espacios de Desplazamiento Condicionado (EDC_i) definidos en el análisis, la celda que contenga ese valor mínimo CAC_{imin} será ahora la celda origen O en el cálculo. Al igual que antes la primera comprobación que haremos será verificar si la celda destino D posee valor en la SCC_i asociada al EDC_i vinculado al CAC_{imin} . Si la celda D tiene valor en SCC_i entonces calculamos su CAC con la fórmula:

Ecuación 31

$$CAC_{id} = CAS_{io} + d \cdot (CC_{io} + CC_{id})$$

donde,

CAC_{id} es el Coste Acumulado Condicionado del EDC_i para la celda destino D
 CAC_{io} es el Coste Acumulado Condicionado del EDC_i de la celda origen O
 d es la distancia geométrica entre la celda O y la celda D
 CC_{io} es el Coste Condicionado asociado a la celda O dentro de la Superficie de Costes Condicionados (SCC_i)
 CC_{id} es el Coste Condicionado asociado a la celda D dentro de la SCC_i

Seguidamente se operaría igual que si la celda D no tuviese valor en SCC_i , comprobándose entonces si D pertenece a una zona de desplazamiento definida como Nodo del EDC_i asociado al CAC_{imin} . En caso afirmativo, la celda permitiría obtener el CAS a partir del CAC, por lo que se calcularía la fórmula siguiente:

Ecuación 32

$$CAS_D = CAC_{io} + d \cdot (CC_{io} + CS_D)$$

donde,

CAS_D es el Coste Acumulado Simple de la celda destino D
 CS_D es el Coste Simple asociado a la celda D dentro de la SCS

Si la zona de desplazamiento de la celda destino no es Nodo del EDC_i , entonces se busca una nueva celda destino asociada a la celda origen O, repitiendo este proceso de cálculo hasta que se comprueben todas las celdas que rodean a O. Cuando esto sucede, se sustituye la celda origen por otra que posea el menor valor del coste acumulado entre todos los calculados hasta ese momento. Todo este proceso de cálculo se aprecia en la Figura 120.

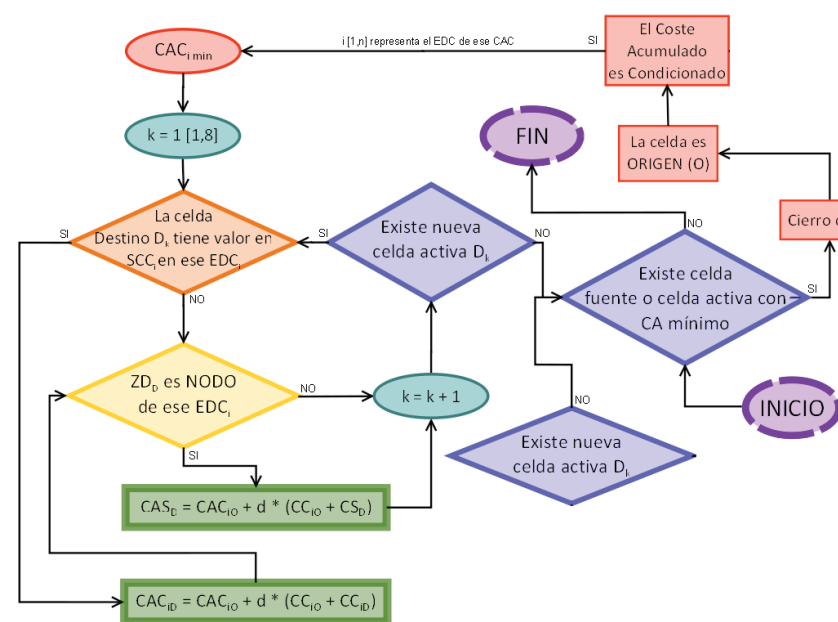


Figura 120. Esquema de cálculo del algoritmo Coste Distancia Condicionado cuando la celda origen presenta un Coste Acumulado Condicionado mínimo (CAC_{min}) asociado al Espacio de Desplazamiento Condicionado EDC_i .

Cuando las Listas de Costes Acumulados no dispongan de ningún valor, el proceso de cálculo habrá terminado. Todas las celdas tendrán asignado el menor valor resultante del coste de desplazamiento entre ellas y la celda fuente más cercana de entre todas las establecidas en el análisis, según el tipo de coste acumulado considerado, CAS o CAC. El proceso completo puede apreciarse en la Figura 121.

Para finalizar el algoritmo se unifican los costes acumulados calculados, de forma que se obtiene un único valor por celda, que denominaremos Coste Acumulado Global (CAG). Este coste corresponde con el menor valor de todos los costes calculados para cada celda, pues indica el tiempo mínimo empleado en llegar a ella desde alguna de las celdas fuente consideradas. Ese valor mínimo representará la potencialidad de ese lugar para ser alcanzado con un coste determinado sin importar los espacios de desplazamiento condicionado que se hayan considerado, ni el medio de transporte empleado para acceder hasta él desde los puntos generadores de desplazamiento pre-determinados.

El resultado final que se obtiene con este método de Coste Distancia Condicionado intenta ajustarse a la realidad que generan determinados tipos de infraestructuras de transporte con restricciones de acceso, que permiten una movilidad específica ajustada al trazado de su plataforma estructural, y que sólo interactúa con otras movilidades por el resto del territorio, en puntos determinados de su recorrido.

En el ejemplo del apartado 5.3.6, intentamos clarificar con más detenimiento el proceso de cálculo del modelo Coste Distancia Condicionado, además de incidir en las diferencias existentes con el modelo Coste Distancia tradicional o simple.

5.3.5. Datos geográficos de salida tras la ejecución del modelo de accesibilidad territorial de Coste Distancia Condicionado

La ejecución del modelo Coste Distancia Condicionado conlleva la generación de multitud de cálculos y operaciones de los que únicamente interesará conservar los valores finales obtenidos en el Coste Acumulado Simple y en cada uno de los Costes Acumulados Condicionados asociados a cada uno de los Espacios de Desplazamiento Condicionado que se definan en el análisis.

Estos resultados se concretan en diferentes archivos ráster que en general, tendrán valores en las mismas celdas que tengan valor no nulo en los respectivos archivos correspondientes a las superficies de costes. Así, el CAS tendrá valor en prácticamente todas las celdas con valor en la SCS. Únicamente no tendrán valor aquellas zonas de desplazamiento que tengan restricciones de desplazamiento con todas las zonas contiguas. Por su parte los CACi tendrán valor en las celdas que posean valor en sus respectivas SCCi asociadas a los correspondientes EDCi.

Además de estos archivos resultantes directos de las operaciones planteadas en los desplazamientos entre las celdas, se añade un nuevo archivo de costes acumulados que unifica todos los anteriores en el denominado Coste Acumulado Global (CAG). Este archivo es el resultado de almacenar en cada celda el valor mínimo de todos los costes acumulados calculados en ella, atendiendo a la Ecuación 33.

Ecuación 33

$$CAG = \min (CAS; CAC_i)$$

De esta forma se obtiene como resultado genérico del Modelo Coste Distancia Condicionado, un valor en cada celda, que expresa el menor coste que debe emplearse para llegar desde ella a la celda fuente más cercana, de entre todas las establecidas en el análisis de accesibilidad considerado.

Por lo tanto se entienden como resultados del Modelo, los siguientes archivos ráster que cubrirán todo el ámbito geográfico considerado en el análisis:

- Un Coste Acumulado Simple (CAS)

- Un Coste Acumulado Condicionado (CAC_i) para cada Espacio de Desplazamiento Condicionado (EDC_i) definido en el modelo
- Un Coste Acumulado Global (CAG) como mínimo valor de todos los costes acumulados obtenidos

5.3.6. Ejemplo de cálculo de costes de desplazamiento mediante el Modelo de Coste Distancia Condicionado

Con la finalidad de clarificar los pasos necesarios en los cálculos previstos en el algoritmo presentaremos un ejemplo sobre la operatividad del mismo, y cuyos pasos de cálculo se recogen detalladamente en el ANEJO 5.

Puesto que las capacidades del algoritmo permiten su uso considerando varios tipos de infraestructuras o modos de transporte, y aunque este proyecto versa exclusivamente sobre la accesibilidad territorial mediante las infraestructuras viarias, emplearemos también en este ejemplo el ferrocarril como zona de desplazamiento específica, para verificar el potencial de este método.

Dispondremos para esta situación descriptiva de una retícula sencilla de 6x6 celdas. Para simplificar los cálculos se supone que el tamaño de celda es 1. Cada tipo de zona de desplazamiento en este ejemplo identificará las diferentes zonas de desplazamiento consideradas:

- Terreno. Valor 1
- Carretera convencional. Valor 2
- Vía de Alta Capacidad (VAC). Valor 3
- Enlace VAC. Valor 4.
- Vía férrea. Valor 5
- Estación de ferrocarril. Valor 6

Las zonas 3 y 4 representan el EDC de las VAC donde 4 es el Nodo del EDC.

Las zonas 5 y 6 representan el EDC del ferrocarril donde 6 es el Nodo del EDC.

Los datos de entrada serán los identificados en la Figura 122.

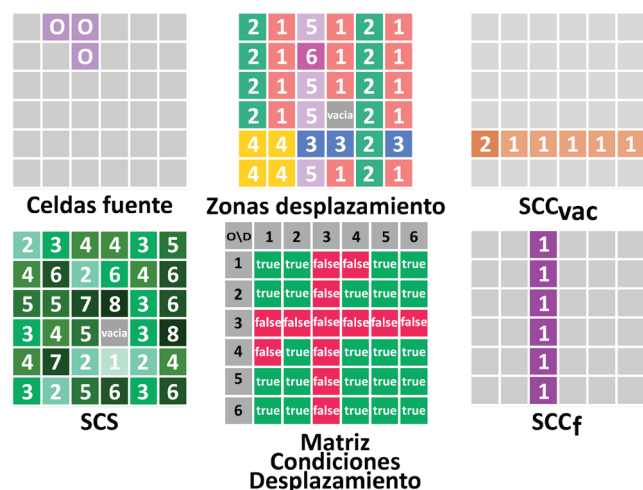


Figura 122. Archivos establecidos como datos de entrada en el ejemplo de ejecución del algoritmo CDC.

Tras la ejecución de los cálculos con el algoritmo CDC, los resultados se recogen en la Figura 123.

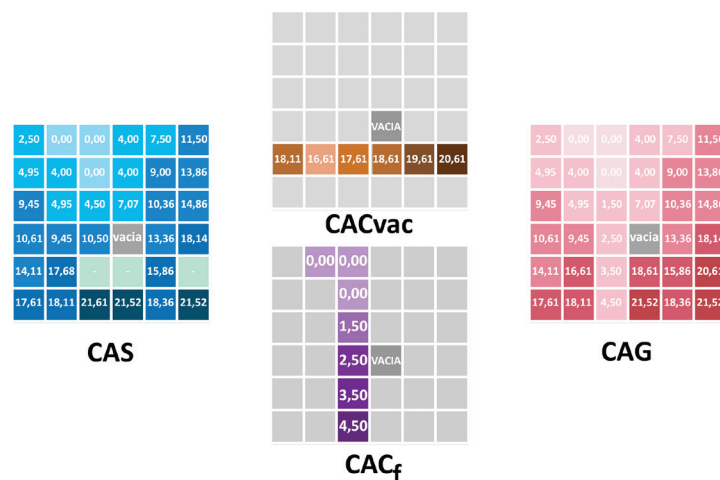


Figura 123. Archivos resultado de la ejecución del algoritmo CDC sobre los datos de entrada del ejemplo.

Realizando una simple comparación celda a celda entre el CA mediante el método Coste Distancia (CD), y el CAG calculado con el algoritmo Coste Distancia Condicionado (CDC), restando los valores de ambas celdas, apreciamos las diferencias existentes. Se comprueba que en este ejemplo un 28% de las celdas varían su valor, con una variación media de un 5,4%, aunque en algún caso se llegan a variaciones de más del 75%. Se verifica por lo tanto el interés de este método CDC para realizar cálculos de accesibilidad con condiciones de limitación de accesos en diferentes infraestructuras territoriales.

5.3.7. Implementación del modelo de Coste Distancia Condicionado sobre gvSIG y SEXTANTE

Para la verificación del modelo Coste Distancia Condicionado se desarrolla durante este proyecto de investigación, una extensión para el programa gvSIG basada en algoritmo Coste Distancia implementado sobre la librería de análisis geoespacial SEXTANTE. En el apartado 2.6 ya comentamos las características principales de estas aplicaciones de software libre, que permiten una gran flexibilidad para emplear y adaptar su código a nuevos requerimientos, como es este caso.

La extensión de cálculo de accesibilidad territorial según Coste Distancia Condicionado se ha desarrollado y testado sobre las versiones 1.10 y 1.12 de gvSIG, y por tanto ha sido implementada usando Java como lenguaje de programación. Internamente consta de dos partes: por un lado tenemos la interfaz gráfica, realizada sobre el gestor de ventanas del escritorio, y por otra parte está el propio algoritmo de cálculo, implementado gracias a la librería SEXTANTE.

Antes de ejecutar el algoritmo de Coste Distancia Condicionado es preciso aportar los datos de entrada imprescindibles para su funcionamiento. Debido a la variedad de los diferentes requisitos implementados en este nuevo método CDC, se plantea una interfaz que se puede desplegar a través de una opción del menú superior de la ventana principal de gvSIG y también con un botón propio de la barra de accesos directos. Esta interfaz está compuesta por tres ventanas en las que se va aportando la información necesaria de forma

consecutiva, pasando de una ventana a la siguiente hasta completar todos los datos, que se almacenan en un único objeto que se transfiere entre las ventanas. La configuración completa de este proceso de entrada de datos se puede guardar en un archivo CSV desde la última pantalla, y ser llamado desde la primera.

En la primera ventana (Figura 124) se solicitan los cuatro archivos ráster que, como mínimo, son obligatorios para definir las Zonas de Desplazamiento¹³¹, la ubicación de las fuentes de los desplazamientos, la Superficie de Coste Simple y las Superficies de Costes Condicionados que hubiese que tener en consideración en el análisis.

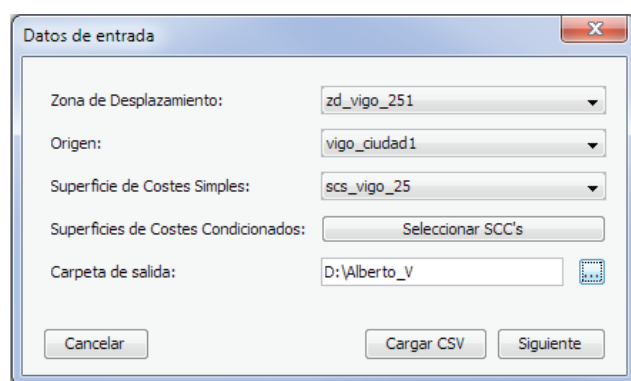


Figura 124. Primera ventana de entrada de datos para la ejecución del algoritmo de Coste Distancia Condicionado.

Debido al funcionamiento de la carga de datos de la librería SEXTANTE, en todos los casos de selección de archivos, es preciso que estos estén marcados como activos en la Tabla de Contenidos (ToC - Table of Contents -) de gvSIG, para que puedan visualizarse en estas ventanas de la interfaz gráfica del algoritmo CDC. De todos los ficheros posibles se escoge el adecuado en cada

¹³¹ En este ejemplo se identifican los siguientes archivos: Zonas de Desplazamiento (zd_vigo_251), la ubicación de las fuentes de los desplazamientos (vigo_ciudad1), la Superficie de Coste Simple (scs_vigo_251) y las Superficies de Costes Condicionados (scs_vac).

opción, salvo en el caso de la Superficie de Costes Condicionados, en donde podría elegirse más de un archivo para definir los costes condicionados de cada uno de los diferentes Espacios de Desplazamientos Condicionados (EDC) necesarios para representar adecuadamente los modos de movilidad existentes (Figura 125).

Para el correcto funcionamiento del algoritmo, tal y como se ha programado, y en base a condicionamientos de la propia operativa de SEXTANTE, se requiere que todas las capas ráster a emplear cumplan las siguientes condiciones:

- Deben cubrir la misma extensión
- Deben tener la misma resolución
- Deben tener por tanto el mismo número de celdas
- El valor de las celdas debería ser un número entero, preferentemente
- El valor “NoData” o “sin dato” se debe asignar al valor “-99999”

Durante la comprobación de los datos de entrada, la aplicación comprueba todas estas condiciones, salvo la del valor “NoData”, con lo que en el caso de que haya algún problema, se avisaría de la imposibilidad de ejecutar el algoritmo CDC.



Figura 125. Ventana de selección de archivos ráster que definen una Superficie de Costes Condicionados (SCC).

En esta primera ventana se define también la carpeta donde se almacenarán los resultados que se obtengan de la ejecución del algoritmo CDC. Ade-

más esta ventana cuenta con un botón para la carga de un archivo CSV, en el que, como comentamos antes, se identifiquen todos los datos necesarios en este proceso de entrada de parámetros para la ejecución del algoritmo CDC. De esta forma, se evita tener que repetir ciertos pasos, cuando los datos de partida son los mismos a otros ya empleados, o muy similares a ellos y sólo es necesario variar alguna variable concreta.

Para definir adecuadamente cada una de las Zonas de Desplazamiento descritas en el archivo ráster correspondiente, se identifican cuatro parámetros que permitirán caracterizarlas mejor para su utilización posterior en el algoritmo de cálculo (Figura 126 y Figura 127). Estos parámetros son:

- **CLASE:** Establece el valor numérico entero que tendrán las celdas de cada tipo de zona de desplazamiento en el archivo ráster especificado, que permite diferenciarlas y operar con ellas de forma individualizada. Estos valores se leen automáticamente de las cifras numéricas existentes en el archivo ráster escogido como Zonas de Desplazamiento.
- **NOMBRE:** Es un campo opcional, recomendable para estructurar convenientemente los datos, en el que se puede incluir una denominación descriptiva (en formato texto) de la zona de desplazamiento o el tipo de infraestructura que permite las comunicaciones por un territorio.
- **ESPACIO DE DESPLAZAMIENTO CONDICIONADO (EDC):** Identifica el Espacio de Desplazamiento Condicionado al que pertenece una zona, que vendrá representada, en el caso de que fuese necesario, por una única Superficie de Costes Condicionados (SCC) asociada a ese EDC. Para ello se dispone de un menú desplegable en el que se puede escoger una de las SCC seleccionadas en el paso anterior.
- **NODO DE EDC:** Indica si esa Zona de Desplazamiento permite una comunicación entre ese espacio y el resto del territorio, evitando las restricciones asociadas a ese EDC. Al menos una de las zonas de desplazamiento dentro de un EDC debe tener valor afirmativo, lo

que se asigna mediante la verificación en la casilla correspondiente. Estas zonas que funcionan como nodo dentro de un EDC permiten calcular costes acumulados condicionados (calculados mediante el algoritmo propuesto) a partir de costes acumulados simples (obtenidos con el procedimiento normal de cálculo de coste distancia), y viceversa.

Definición de Zonas de Desplazamiento

Clase	Nombre	EDC	Nodo
1			<input type="checkbox"/>
2			<input type="checkbox"/>
3			<input type="checkbox"/>
4			<input type="checkbox"/>

Cancelar Anterior Siguiente

Figura 126. Ventana para la definición de los parámetros de cada Zona de Desplazamiento. Sin datos.

Definición de Zonas de Desplazamiento

Clase	Nombre	EDC	Nodo
1	Terreno		<input type="checkbox"/>
2	Carretera		<input type="checkbox"/>
3	Autopista	scc_vac	<input type="checkbox"/>
4	Enlace	scc_vac	<input checked="" type="checkbox"/>

Cancelar Anterior Siguiente

Figura 127. Ventana para la definición de los parámetros de cada Zona de Desplazamiento. Con datos identificados que se adaptan al ejemplo comentado en el apartado 5.3.3.

Como último paso, se plantea la definición de la Matriz de Condiciones de Desplazamiento (Figura 128), en la que se identifican los permisos de movilidad y las restricciones de paso para el cálculo del Coste Acumulado Simple, entre cada Zona de Desplazamiento (ZD) definida anteriormente en el archivo rá-

ter correspondiente. Para ello deben activarse o desactivarse las casilla de verificación asignada entre cada par de ZD.

Se aplican por defecto una serie de condiciones en función de las características de las zonas de desplazamiento definidas. Estas condiciones establecidas por defecto a partir de la definición de las zonas, intentan establecer los casos de movilidad habitual que se concretan en los siguientes puntos:

- Las celdas de una misma zona de desplazamiento pueden comunicarse entre sí. Parece razonable que de forma normal una zona permita moverse dentro de sí misma. De otra manera, sólo se podrían establecer movimientos en los límites de esas zonas, que quizás pueda ser de interés en algún estudio (y así podría indicarse en la Matriz de Condiciones), pero por lo general se permitirá movilidad interna en todas las zonas.
- Las celdas de las zonas de desplazamiento identificadas como Nodo de un Espacio de Desplazamiento Condicionado pueden comunicarse con las celdas de cualquier zona. Para dotar de la mayor movilidad posible a los nodos, entendiendo que estos son lugares que representan el nivel de comunicación máximo en el territorio, se permitirá por defecto que se comuniquen con todas las zonas. Evitaremos así, que una mala configuración de las zonas de desplazamiento imposibilite salir de una zona condicionada pese a tener un nodo, pues éste podría estar rodeado por una zona con la que en principio sería incompatible según la Matriz de Condiciones, impidiendo ese movimiento.
- Las celdas identificadas como “fuente” o como “origen-destino” de los desplazamientos, y que se recogen en un archivo independiente, tendrán siempre la posibilidad, como ya comentamos, de comunicarse con las celdas limítrofes sin tener en consideración las zonas de desplazamiento en las que se ubican, y consecuentemente sin atender a las restricciones impuestas en esta Matriz de Condiciones.

Aunque se fijen por defecto unas restricciones de partida, el modelo permite una completa libertad para que el usuario establezca las condiciones de esa matriz, y en cualquier momento puede variar la configuración de la misma. Se añaden botones para marcar o desmarcar todas las casillas de verificación, además de permitir hacerlo individualmente sobre cada una de ellas.

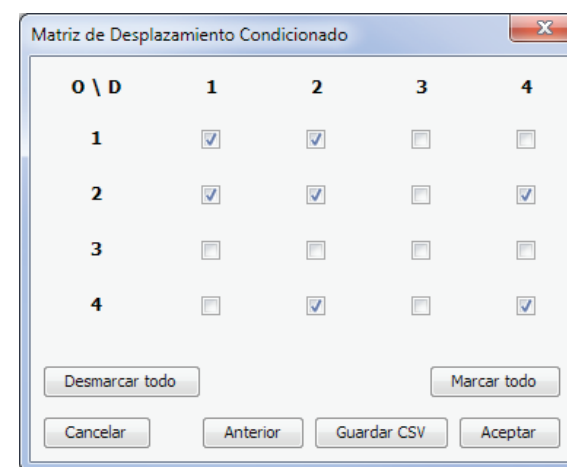


Figura 128. Ventana para la definición de la Matriz de Condiciones de Desplazamiento. Aparecen marcados los permiso de movilidad asignados en el ejemplo descrito en el apartado 5.3.3.

Para no tener que repetir en futuros cálculos la definición de todos los parámetros asignados en esta ocasión, se permite en esta última ventana, guardar en un fichero CSV toda esta información, de manera que pueda ser activada en la primera ventana del algoritmo, como vimos antes. Así podemos almacenar los parámetros que se emplearon en ciertos cálculos y usarlos en nuevos análisis, si fuese necesario.

Una vez que confirmemos los parámetros de entrada, se nos mostrará una ventana con la hora de comienzo del algoritmo (Figura 129) y, una vez que éste termine, con la hora de finalización del cálculo ejecutado con el método CDC (Figura 130).

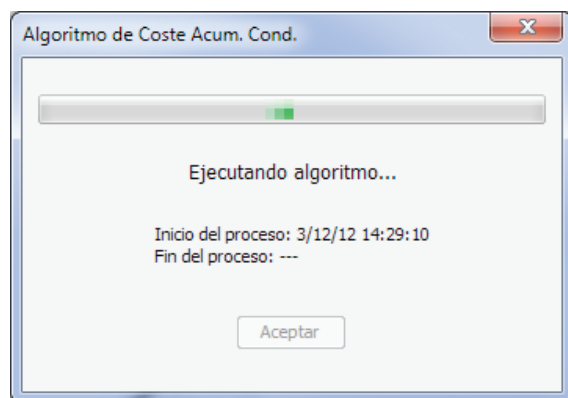


Figura 129. Ventana de ejecución del algoritmo CDC.

Al aceptar esa ventana final, se añadirán al ToC de gvSIG las capas resultantes gracias a la ejecución del algoritmo CDC, esto es, el Coste Acumulado Simple, los Costes Acumulados Condicionados que intervengan en el proceso, y el Coste Acumulado Global.

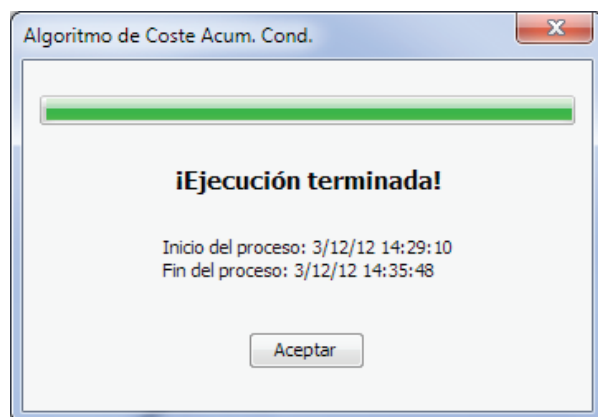


Figura 130. Ventana final de la ejecución del algoritmo CDC.

6

Aplicación del Método de Coste Distancia Condicionado

6.1.1. Software empleado para las operaciones de análisis geoespacial

6.1.2. Elección del ámbito geográfico de análisis

6.1.3. Datos de entrada para los cálculos de accesibilidad

6.1.3.1. Pendientes

6.1.3.2. Infraestructuras viarias

6.1.3.3. Zonas de desplazamiento

6.1.4. Comparación entre los tres métodos para calcular la accesibilidad a la ciudad de Vigo

6.1.4.1. Método de Coste Distancia sin considerar las VAC

6.1.4.2. Método de Coste Distancia considerando las VAC

6.1.4.2.1. Análisis comparativo del método CDVAC

6.1.4.3. Método de Suma de Costes Parciales

6.1.4.3.1. Análisis comparativo de los métodos SCP y CDVAC

6.1.4.4. Método de Coste Distancia Condicionado

6.1.4.4.1. Análisis comparativo de los métodos CDC y CDVAC

6.1.5. Comparación entre los tres métodos para calcular la accesibilidad a las capitales de comarca

6.1.5.1. Método de Coste Distancia considerando las VAC

6.1.5.2. Método de Suma de Costes Parciales

6.1.5.3. Método de Coste Distancia Condicionado

6.1.6. Conclusiones de la comparación de métodos

6.2. Análisis de precisión del método de Coste Distancia Condicionado

6.2.1. Datos de entrada para los cálculos de accesibilidad

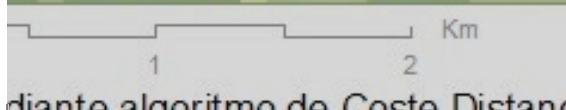
6.2.2. Comparación entre CDC y CDVAC para el cálculo de la accesibilidad a la ciudad de Vigo

6.2.2.1. Método de Coste Distancia considerando las VAC aplicado en la accesibilidad de Vigo con resolución de 25 metros

6.2.2.2. Método de Coste Distancia Condicionado aplicado en la accesibilidad de Vigo con resolución de 25 metros

6.2.3. Comparación con análisis de redes

6.2.4. Conclusiones sobre el análisis de precisión del método CDC





6. Aplicación del método de Coste Distancia Condicionado

Los modelos de accesibilidad desarrollados en esta investigación se corresponden o están basados en el algoritmo Coste Distancia que permite obtener el valor de coste acumulado para alcanzar cualquier lugar del territorio desde otros puntos determinados previamente. Como hemos definido en el capítulo anterior, en este proyecto se proponen dos métodos nuevos: el de Suma de Costes Parciales y el de Coste Distancia Condicionado. Debemos evaluar ahora su eficacia para valorar la influencia de considerar correctamente el acceso a las Vías de Alta Capacidad (VAC) en el análisis de accesibilidad de una región. Para ello se propone un ensayo sobre un ámbito territorial acotado en el que se aplica el método de Coste Distancia considerando y sin considerar las VAC, el método de Suma de Costes Parciales y el método de Coste Distancia Condicionado. En estos dos métodos propuestos, la consideración de las VAC está implícita en los planteamientos de los mismos. Los resultados obtenidos por cada uno de estos métodos se comparan entre sí y se analizan para intentar extraer las conclusiones más relevantes sobre la eficacia de cada uno de estos procedimientos de cálculo de accesibilidad.

6.1.1. Software empleado para las operaciones de análisis geoespacial

Durante este proyecto, la mayor parte de las operaciones realizadas sobre los datos geográficos empleados se realizaron mediante el programa gvSIG¹³² y la extensión SEXTANTE¹³³ como librería de algoritmos para la ejecución de geoprocesos, en especial la función “Coste Acumulado (isotrópico)”, que se corresponde con el algoritmo Coste Distancia descrito en apartados anteriores. Como complemento a estos programas, se emplearon algunas extensiones de gvSIG desarrolladas desde Cartolab, como OpenCADTools¹³⁴ para la edición de geometrías, y NavTable¹³⁵ para el manejo y tratamiento de datos alfanuméricos vinculados sobre entidades geográficas. Además se emplearon scripts de-

¹³² <http://www.gvsig.org>

¹³³ <http://www.sextantegis.com/>

¹³⁴ <https://github.com/opencadtools/opencadtools>

¹³⁵ <http://navtable.github.io/>

sarrollados sobre gvSIG para la ejecución de los algoritmos de Suma de Costes Parciales y de Coste Distancia Condicionado.

Para el análisis de la utilización de modelos de accesibilidad en otros software SIG, y para su empleo en determinados procesos y de forma puntual, también se ha empleado IDRISI¹³⁶, GRASS¹³⁷, QGIS¹³⁸ y ArcGIS¹³⁹.

6.1.2. Elección del ámbito geográfico de análisis

El ámbito de análisis escogido para este ensayo es el mismo que el planteado en el apartado 4.3.2, donde finalmente se seleccionaba la zona de influencia resultante para la ciudad de Vigo (Figura 131), que usaremos para la comparación entre los tres métodos de cálculo de accesibilidad. Se trata de una superficie aproximada de 1.560 km² al sur de la provincia de Pontevedra, en la que discurren 221 Km de vías de altas capacidades o de altas prestaciones.

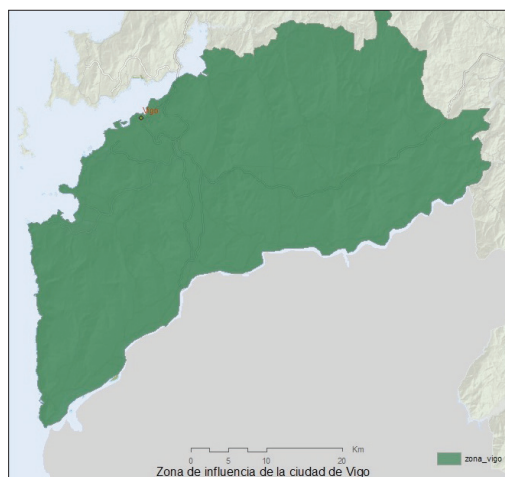


Figura 131. Ámbito geográfico de análisis para los ensayos de accesibilidad.

¹³⁶ <http://clarklabs.org/>

¹³⁷ <http://grass.osgeo.org/>

¹³⁸ <http://www.qgis.org/>

¹³⁹ <http://www.arcgis.com/>

5.3.3. Datos de entrada para los cálculos de accesibilidad

Los datos de entrada a emplear en los cálculos de accesibilidad en este ensayo coincidirán en parte con los expuestos en el apartado 4.3.3. En este caso para buscar atender a diferentes configuraciones, se propone ejecutar dos ensayos, uno sobre una celda fuente única, y otro sobre un conjunto de celdas fuente distribuidas por toda la zona de análisis. En el primer caso se toma como celda fuente un punto central de la ciudad de Vigo (Figura 77), y para el otro estudio se consideran las capitales de comarca incluidas en la zona de estudio (Figura 132).

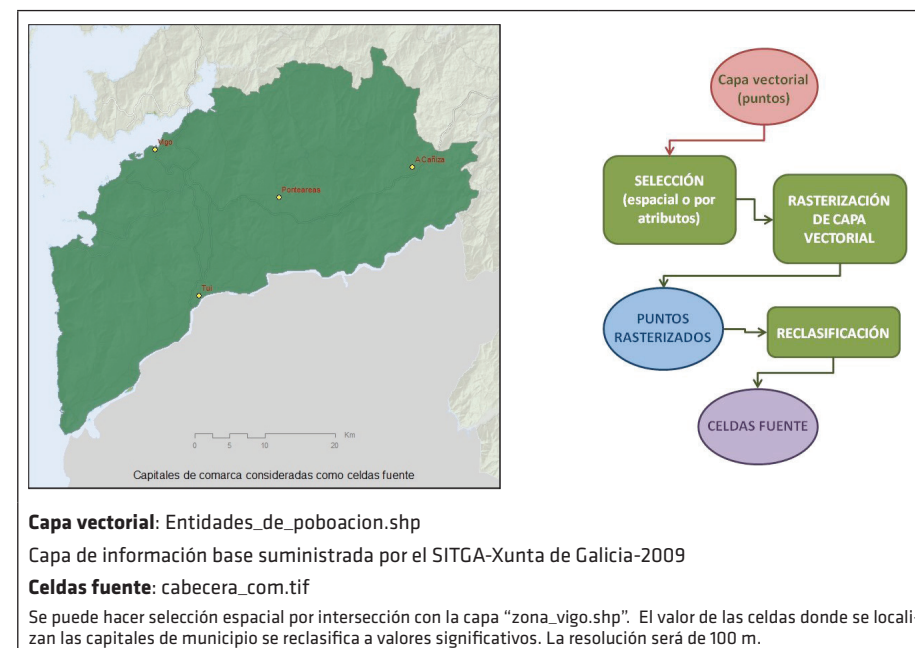


Figura 132. Ubicación de las capitales de municipio consideradas como celdas fuente para los cálculos de accesibilidad.

6.1.3.1. Pendientes

Ver apartado 4.3.3.1

6.1.3.2. Infraestructuras viarias

Ver apartado 4.3.3.2, aunque en este ensayo no se considerarán las velocidades medias por tramo en la red autonómica, y se asignará una velocidad tipo para todas las carreteras con dicha titularidad.

La única diferencia entre los métodos en el empleo de estos datos será si se tienen en cuenta o no, las Vías de Alta Capacidad (VAC) en los cálculos (Figura 133), como indicaremos en cada caso. Al usar el método de Coste Distancia, todo el viario se considera de igual forma, se empleen o no las VAC, pero en los dos métodos propuestos en esta investigación, hay que tener en cuenta algunas diferencias importantes para el proceso de cálculo.

El método de Suma de Costes Parciales (SCP) precisa diferenciar en la red viaria, el trazado de las Vías de Alta Capacidad que únicamente tendrán conexión con el resto de la estructura viaria en los enlaces. Tanto las VAC como los enlaces serán nuevos datos a tener en cuenta para el establecimiento de las fuentes y la superficie de costes de estos análisis de accesibilidad.

El método de Coste Distancia Condicionado (CDC) también precisa considerar las VAC y los enlaces como elementos diferenciados del proceso de cálculo. Además necesita conocer los cruces a distinto nivel entre las VAC y el viario convencional, que serán tenidos en cuenta para establecer correctamente las Zonas de Desplazamiento empleadas en este método, como describiremos en el siguiente apartado.

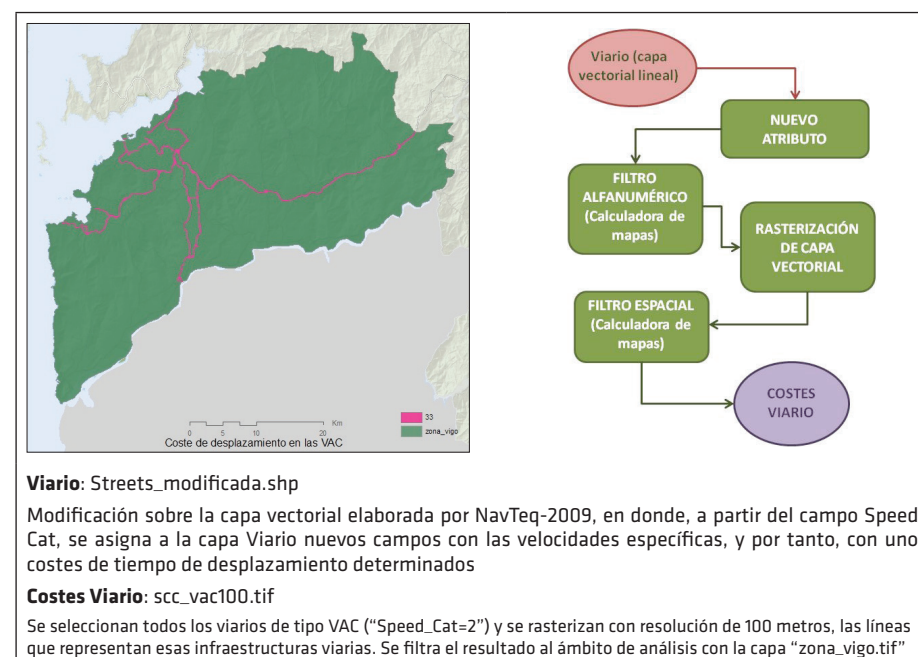


Figura 133. Coste de desplazamiento en el trazado de las Vías de Alta Capacidad.

6.1.3.3. Zonas de desplazamiento

Los dos métodos propuestos en este trabajo, requieren considerar otros elementos territoriales para ejecutar los algoritmos además de la superficie de coste y los lugares fuente. Tanto el método de Suma de Costes Parciales (SCP) como el método de Coste Distancia Condicionado (CDC), necesitan conocer la ubicación de los enlaces de las VAC, donde se permite la comunicación entre estas infraestructuras viarias específicas y el resto del territorio. Para ello se realiza una búsqueda de los enlaces existentes en estas infraestructuras en la Galicia en 2010, sobre información existente y a partir de imágenes aéreas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.¹⁴⁰

¹⁴⁰ <http://www.ign.es/PNOA/>

Se seleccionan los enlaces ubicados en la zona de análisis (Figura 134), intentando ajustarse a la realidad existente, aunque no se hace una comprobación exhaustiva de ello por no ser objeto de este trabajo. No se tiene en consideración para este proyecto de investigación la restricción de giros en estos enlaces, por lo que en todos los casos se acepta que existe la posibilidad de comunicación en cualquier sentido y dirección dentro de cada VAC.¹⁴¹

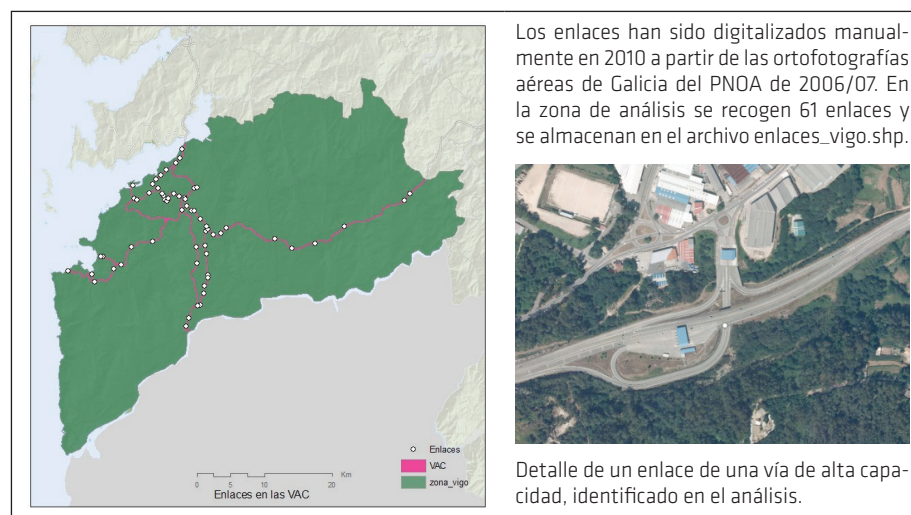


Figura 134. Ubicación de los enlaces considerados en las Vías de Alta Capacidad del ámbito de análisis.

¹⁴¹ Esta hipótesis de trabajo no es del todo realista con la configuración actual de todos los enlaces existentes, pues alguno de ellos presenta restricciones en algún sentido de circulación. Sin embargo, en general, salvo casos puntuales, la mayor parte de los enlaces permiten todas las comunicaciones. Por otro lado, es probable que haya algún enlace a mayores de los considerados, o que la ubicación de alguno de ellos no sea del todo correcta. No se ha considerado prioritario este dato para la ejecución de la investigación, por lo que se trabajó con la información disponible. Además como se estableció en los objetivos del estudio, esta investigación busca encontrar y valorar nuevos métodos de cálculo más eficientes, para lo cual considerar o no restricciones de giro diferentes a las reales, o disponer de más o menos enlaces, no tiene influencia para la finalidad del proyecto. Atender a estas restricciones significaría un mayor tiempo en la búsqueda de información, así como una modelización de zonas de desplazamiento más compleja de lo que se emplea en este análisis, que por otro lado sería posible implementar sin dificultad con el método de Coste Distancia Condicionado. Pero fundamentalmente por no aumentar la complejidad de este ensayo, se ha optado por hacer una simplificación de estos datos de los enlaces, para agilizar las operaciones de los ensayos y los tiempos de cálculo precisos.

Adicionalmente, el método de CDC necesita identificar de forma individual cada uno de las Zonas de Desplazamiento en las que se va a dividir el ámbito geográfico de análisis. En el caso considerado en este análisis, que se basa en el planteamiento realizado en el apartado 5.3.3.1, las zonas clasificadas como Terreno y como Carreteras convencionales (sin considerar por tanto las VAC) se pueden obtener a partir de la Superficie de Costes. Puesto que los valores de fricción dependen de la velocidad, y esta es muy diferente, encontramos un valor umbral que nos permite diferenciar el terreno de la carretera. Ese valor en este ejemplo se corresponde con el coste 360, de forma que todos los valores iguales o menores a 360 definirán celdas pertenecientes a la zona de Carreteras convencionales, y las celdas con valor superior a esa cifra, pertenecerán a la zona representativa del Terreno (Figura 135).

Las otras dos Zonas de Desplazamiento saldrán de las capas representativas de las VAC y los enlaces sobre estas infraestructuras. Sin embargo, su aplicación no sale directamente de las geometrías de estos elementos, sino que debemos considerar su relación con las otras zonas, por lo que es necesario realizar algún proceso de ajuste.

Puesto que las carreteras convencionales pueden cruzar las VAC, en primer lugar debemos encontrar los puntos de paso entre ambas, y posteriormente eliminar esos lugares del trazado que identifica a las VAC. De esta manera, en la representación de las Zonas de Desplazamiento, las VAC mostrarán una geometría discontinua, permitiendo ser atravesadas por viario convencional en los lugares que sea preciso.

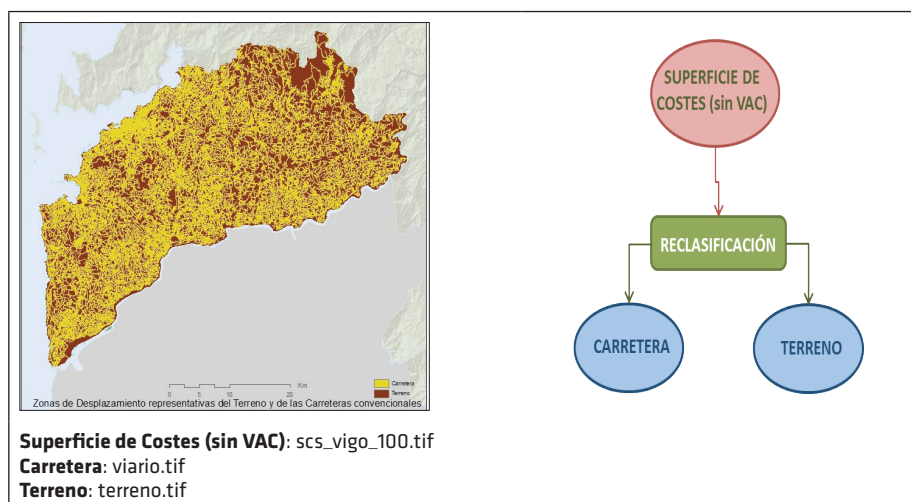


Figura 135. Zonas de Desplazamiento representativas del Terreno y de las Carreteras convencionales, necesarias para la ejecución del algoritmo CDC.

Para conseguir la relación entre las carreteras convencionales – CARRETERA – y las vías de alta capacidad –VAC– es necesario encontrar las intersecciones entre ambos viarios. Para ello se suman los dos ráster, obteniendo un resultado mayor en aquellas celdas que tienen valor en ambos ficheros. Esos cruces se deben eliminar posteriormente de la capa VAC, de forma que se obtiene una zona con el trazado discontinuo en estas infraestructuras.

En el caso de los enlaces, para asegurar una buena conexión definimos estos como un área circular con centro el punto considerado como enlace. Sobre la capa vectorial que recoge los puntos que localizan los enlaces de las VAC –enlaces_vigo_26jun10.shp – se calcula una zona de influencia (buffer) de 500 metros de radio, que posteriormente se rasteriza.

Con las capas debidamente reclasificadas (TERRENO 1, CARRETERAS 2, VAC 3, ENLACES 4)¹⁴² se procede a la unión de todas ellas, quedándonos con el valor

¹⁴² Aunque no tiene porqué ser así, los valores de cada capa ráster, además de indicar la clase del elemento territorial que está distinguiendo, en este caso nos sirve también para definir el orden en el que se deben superponer las capas. Debe entenderse como que la capa de valor más alto,

mayor para la celda en el caso de que varias capas tuviesen valor en ella. Así, el enlace, como nodo de comunicación de las VAC, se superpone sobre todas las otras zonas, las VAC sobre las carreteras convencionales, y estas sobre el terreno. En la Figura 136 se muestra el esquema de los procesos a seguir para obtener las Zonas de Desplazamiento. La configuración final obtenida representa las Zonas de Desplazamiento definitivas a considerar en el cálculo del CDC (Figura 137; Figura 139; Figura 140).

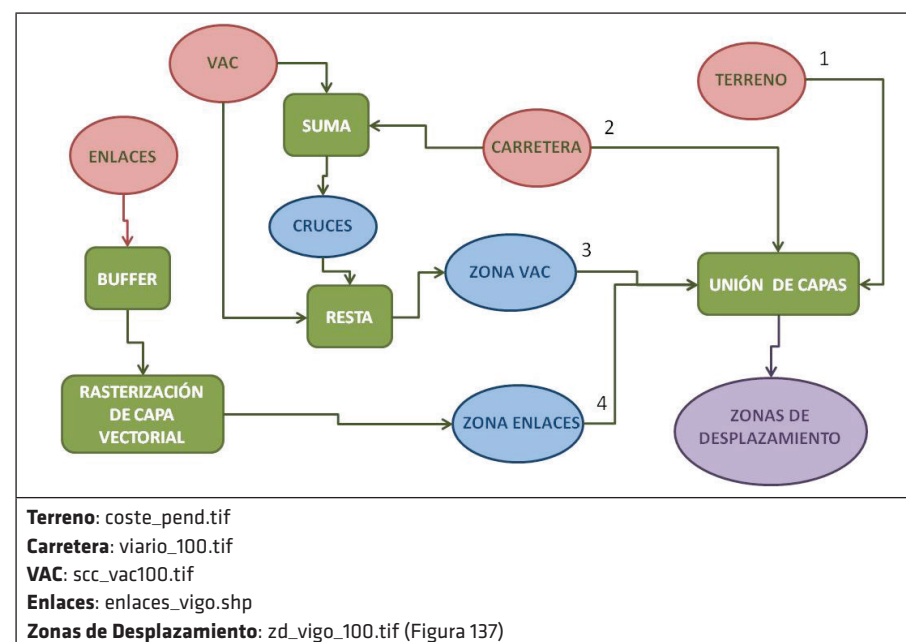


Figura 136. Diagrama de las operaciones espaciales necesarias para obtener las Zonas de Desplazamiento.

En este ensayo, con una resolución de 100 metros, y en un ámbito de gran densidad viaria, la Zona de Desplazamiento (ZD) correspondiente a las Ca-

se posiciona por encima de todas las de valor inferior. De esta forma las celdas con valor en varias capas, finalmente toma el valor mayor de todos los posibles en la capa definitiva de las Zonas de Desplazamiento.

reteras Convencionales representa más de la mitad del espacio de análisis, concretamente el 57,6% (Tabla 27). Realmente la superficie ocupada por las infraestructuras viarias no tiene ese porcentaje de ocupación en una región, pero para el análisis que estamos realizando en este ensayo, es aceptable, pues en realidad la red viaria de esta región es extremadamente densa.

La ZD del Terreno ocupa el 39,2%. Y la ZD de los Enlaces y la ZD de las VAC representan el aproximadamente 3,2% restante. La decisión de definir los enlaces con un área circular de 500 metros de radio, le otorgan una superficie mucho mayor que las celdas ocupadas directamente por las VAC (Figura 138), aunque en la realidad el trazado de estas infraestructura es claramente más extenso en superficie que los enlaces definidos por una única celda. También debemos recordar, que una gran parte del trazado de las VAC está oculto por la ZD de las carreteras convencionales, para permitir los cruces a distinto nivel, lo que disminuye su participación en este análisis porcentual de superficies.

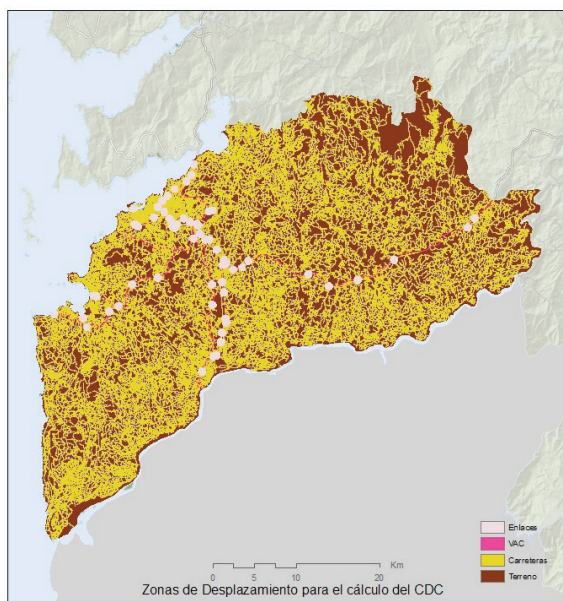


Figura 137. Zonas de Desplazamiento completas para la ejecución del algoritmo CDC.

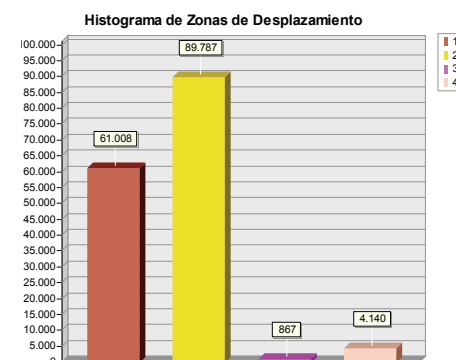


Figura 138. Histograma de las Zonas de Desplazamiento en el ámbito de análisis en función del número de celdas ocupadas por cada zona.

Tabla 27. Distribución del número de celdas por Zona de Desplazamiento en el ámbito geográfico de análisis.

CDN	CONTEO	% CONTEO
1 - Terreno	61.008	39,2%
2 - Carretera	89.787	57,6%
3 - VAC	867	0,6%
4 - Enlace	4.140	2,7%
TOTALES	155.802	100%

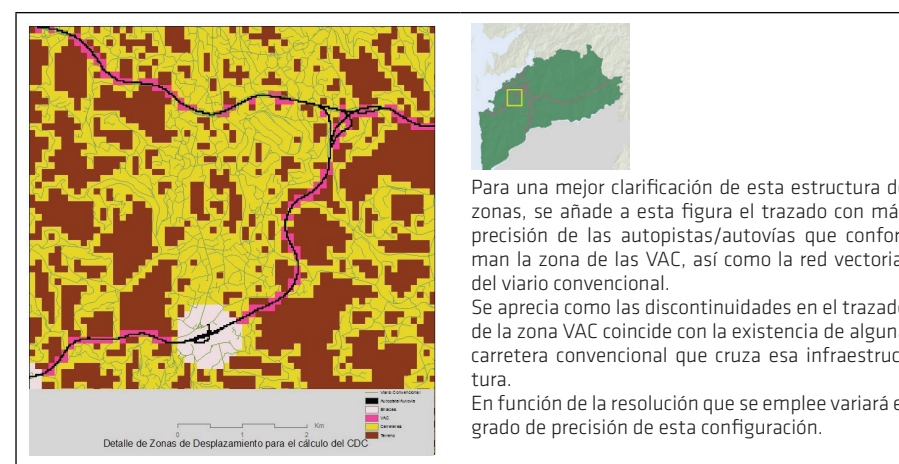


Figura 139. Detalle de la configuración de las Zonas de Desplazamiento definitivas para el cálculo del algoritmo CDC



Figura 140. Imagen aérea del PNOA en la zona de detalle del ámbito de estudio. Detalle de un enlace sobre VAC.

Como ya comentamos anteriormente, es posible identificar muchas más Zonas de Desplazamiento para atender a diferentes circunstancias que se quieran tener en cuenta en el análisis de la accesibilidad, como el tipo de suelo, las zonas naturales, la hidrografía, las edificaciones, o cualquier otra parcelación del territorio que sea necesaria para conseguir el mejor detalle de representación de la realidad que se quiera modelar. En este proyecto, se considera que las ZD asignadas son suficientes para cumplir con los objetivos buscados.

6.1.4. Comparación entre los tres métodos para calcular la accesibilidad a la ciudad de Vigo

Durante la presente investigación se utiliza el algoritmo de Coste Distancia para el cálculo de la accesibilidad territorial y además se proponen otros dos métodos basados en éste, y que permiten superar, mediante procedimientos diferentes, las limitaciones de operatividad que el método Coste Distancia impone por su metodología de cálculo. Se hace imprescindible en este trabajo comparar los dos nuevos métodos propuestos, de Suma de Costes Parciales y de Coste Distancia Condicionado, con el procedimiento ya cono-

cido. El análisis y evaluación de los resultados obtenidos ofrecerá la utilidad final de los nuevos procedimientos, y permitirá estudiar con mayor detenimiento la validez de cada uno de los métodos.

Para cumplir con este objetivo se plantea un ensayo de accesibilidad aplicado sobre el sur de la provincia de Pontevedra (Galicia) a partir de cuatro cálculos de coste acumulado. Tomando como celda fuente un punto central de la ciudad de Vigo, coincidente con la ubicación de la Casa Consistorial, se calculan los costes acumulados en los desplazamientos en todo el ámbito geográfico de análisis, mediante los distintos métodos de cálculo de accesibilidad. El método de Coste Distancia se emplea considerando (CDVAC), y sin considerar (CDN), las Vías de Alta Capacidad (VAC) en los datos de entrada. Se calcula con el método de Suma de Costes Parciales (SCP) la accesibilidad atendiendo a las VAC a partir de sus enlaces. Y se obtiene también la accesibilidad por el procedimiento de Coste Distancia Condicionado (CDC), en función de las posibilidades de comunicación que se otorga a cada elemento territorial considerado en el análisis.

Analizaremos los resultados de cada uno de los algoritmos, y haremos una valoración de las diferencias existentes entre ellos.

6.1.4.1. Método de Coste Distancia sin considerar las VAC

Ver apartado 4.3.4.

6.1.4.2. Método de Coste Distancia considerando las VAC

El mismo método de Coste Distancia lo podemos ejecutar considerando en la Superficie de Costes la participación de las VAC. Debido al proceso operativo de este algoritmo, en cualquier punto del trazado de estas infraestructuras, se podrá enlazar con ellas para el cálculo de los costes de desplazamientos. No se consideran por tanto, las limitaciones de acceso que este viario establece para una adecuada circulación.

Disponer de los trazados de las VAC en la superficie de costes, provoca fundamentalmente dos efectos en el resultado de los cálculos de costes acumulados en los desplazamientos. Por un lado se reducen considerablemente

los tiempos en las zonas próximas a las VAC, que se traduce en un menor coste acumulado en el ámbito de estudio. Gracias a los análisis estadísticos de los valores obtenidos en la capa ráster calculada (Tabla 28), se constata que los valores disminuyen un 31% con respecto a no considerar las VAC. Y por otro lado, se aprecia como los bordes de los anillos de tiempos establecidos se ramifican con mayor intensidad, estirándose en las zonas coincidentes con los trazados del viario de alta capacidad (Figura 141 y Figura 142).

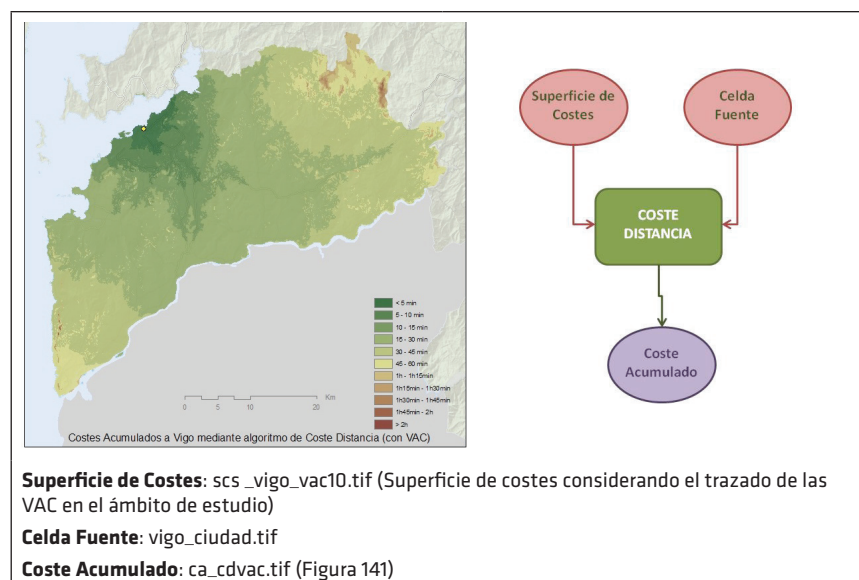


Figura 141. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Coste Distancia considerando el Viario de Alta Capacidad.

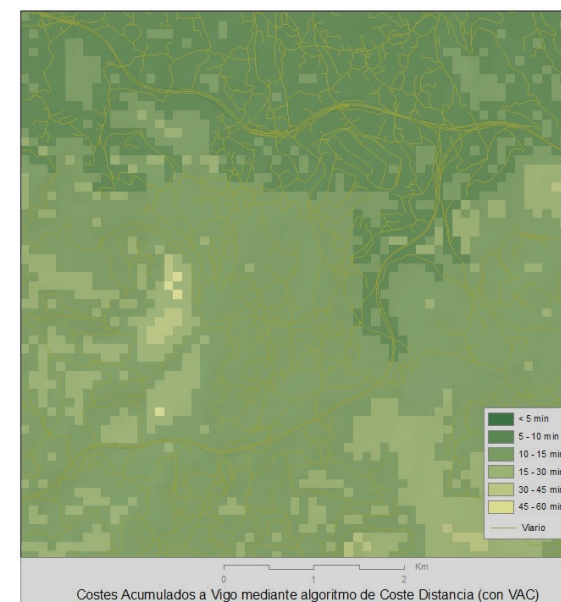


Figura 142. Detalle del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia considerando las VAC.

El tiempo acumulado más alto obtenido en este método es menor que antes por la mayor velocidad que confieren las Vías de Alta Capacidad en el territorio, reduciéndose en más de 10 minutos (concretamente 635 segundos), con un valor máximo de 8.714 segundos (Tabla 28), lo que supone un 6,8% menos que el valor máximo por el método anterior. Como ya comentamos, el coste acumulado medio para todo el ámbito también se reduce considerablemente (en un 31,7%), hasta alcanzar los 1.677,5 segundos. La desviación típica se sitúa en 819 segundos, con lo que el coeficiente de variación es del 48,8%.

La distribución del coste acumulado muestra claramente cómo se concentran los tiempos en zonas de rango inferior. Se constata que casi el 60% de la superficie total del ámbito de análisis, obtiene un tiempo acumulado inferior a 30 minutos (Figura 143), frente al 28,9% de superficie en ese rango obtenida con el método Coste Distancia sin considerar las VAC (CDN). Además ahora se marca un pico en la franja de 15-30 minutos con un porcentaje del 43%, fren-



te al pico de 33,1% en la franja 30-45 min del método CDN. Sin embargo, la suma de los tiempos en cada rango sigue manteniendo el máximo en la franja correspondiente a 30-45 minutos, pero con un valor máximo de 40,6% de la suma total de los tiempos acumulados en la zona de estudio (Figura 144), frente al 30,1% obtenido en CDN (Tabla 28).

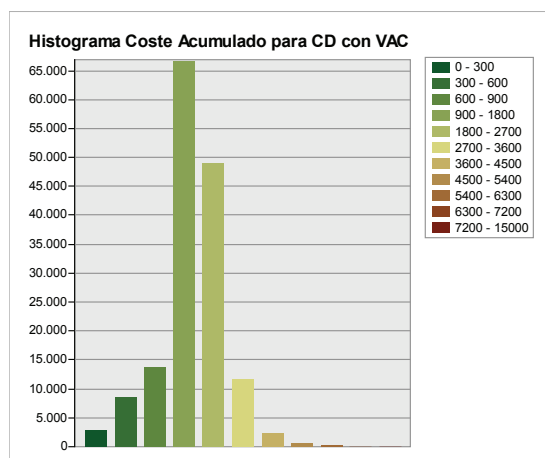


Figura 143. Histograma del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia considerando las VAC para el ámbito geográfico de análisis.

Tabla 28. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, considerando las VAC.

CDVAC	CONTEO	% CONTEO	MIN	MAX	RANGO	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA
< 5 min	2.955	1,90%	0	300	300	203,0	68,2	214	599.994	0,23%
5 - 10 min	8.770	5,63%	301	600	299	462,9	85,1	469	4.059.250	1,54%
10 - 15 min	13.971	8,97%	601	900	299	761,8	88,1	768	10.642.600	4,04%
15 - 30 min	67.035	43,02%	901	1.800	899	1.351,3	253,2	1.352	90.583.700	34,35%
30 - 45 min	48.394	31,06%	1.801	2.700	899	2.211,3	254,1	2.197	107.016.000	40,58%
45 min - 1h	11.338	7,28%	2.701	3.600	899	3.006,5	235,2	2.957	34.087.700	12,92%
1h - 1h 15min	2.445	1,57%	3.601	4.500	899	3.981,4	250,5	3.955	9.734.490	3,69%
1h15min - 1h30min	648	0,42%	4.501	5.395	894	4.874,2	270,3	4.829	3.158.490	1,20%
1h30min - 1h45min	211	0,14%	5.401	6.286	885	5.719,2	222,5	5.695	1.206.750	0,46%
1h45min - 2h	28	0,02%	6.314	6.980	666	6.554,7	186,6	6.522	183.531	0,07%
> 2h	13	0,01%	7.204	8.714	1.510	7.905,3	449,9	7.924	102.769	0,04%
TOTALES	155.808	100%	0	8.729	8.729	1.692,7	819,0	1.603	263.734.787	100%

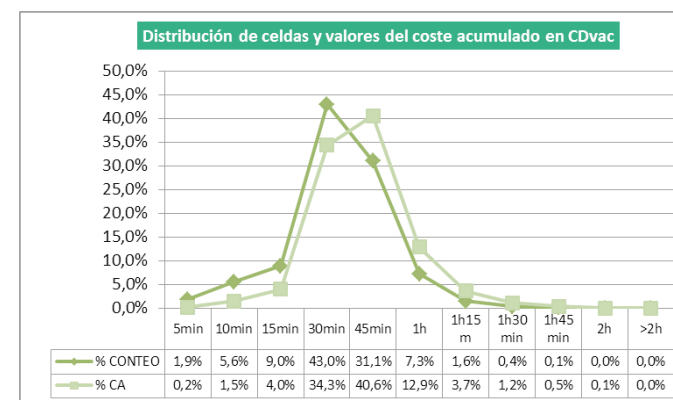


Figura 144. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, considerando las VAC.

6.1.4.2.1. Análisis comparativo del método CDVAC

Si analizamos las variaciones de superficie y de valores calculados en cada franja entre el método de Coste Distancia sin considerar las VAC (CDN) y considerándolas (CDVAC), apreciamos la importante variación que se produce (Tabla 29). Como media la superficie de cada una de las franjas de tiempo varía entorno al 93,3% de su tamaño, y la variación en tiempo en valor absoluto supone un 93,5%, aunque su variación en tiempos sólo varía un 31,2% pues unas celdas aumentan de tiempo y otras disminuyen. Considerar las VAC en el cálculo de costes acumulados en el ámbito de estudio, llega incluso a variaciones que suponen un aumento de más del 160% de la superficie de algún rango. Los mayores cambios se producen en las franjas de menos de 30 minutos, como ya habíamos comentado anteriormente.

Tabla 29. Variación porcentual de superficie y costes acumulados en cada uno de los rangos de tiempo, entre considerar o no las VAC en el método de Coste Distancia.

CDN-CDVAC	% Variación superficie	% Variación suma
< 5 min	-164,8%	-176,1%
5 - 10 min	-142,4%	-137,5%
10 - 15 min	-130,8%	-132,4%
15 - 30 min	-96,2%	-88,8%
30 - 45 min	6,1%	7,3%
45 min - 1h	66,3%	67,3%
1h - 1h 15min	87,4%	87,3%
1h15min - 1h30min	87,5%	87,4%
1h30min - 1h45min	73,5%	73,7%
1h45min - 2h	89,5%	89,7%
> 2h	81,4%	80,9%
TOTALES	0%	31,2%

Casi un 75% de la superficie del ámbito de estudio (concretamente un 74,4%) varía en el rango de tiempo acumulado entre calcularlo por el método de Coste Distancia teniendo en cuenta las VAC, o sin considerarlas (Figura 145). Solo un 0,2% de las celdas (en concreto 369 celdas) no cambian el coste acumulado que se calcula en ambos métodos, coincidiendo éstas con zonas muy próximas a la celda fuente. El resto de la región de análisis, el 99,8% restante, varía de forma significativa el valor de los costes acumulados, con una variación máxima de 3.401 segundos, una variación media de 781,7 segundos, y una desviación típica en las diferencias entre estos valores de 473,5 segundos. El rango de la diferencia de tiempos entre ambos métodos, que ocupa mayor extensión en el ámbito de estudio, se corresponde con el valor entre 5 y 10 minutos, con un 35,4% de la superficie total (Tabla 30 y Figura 146).

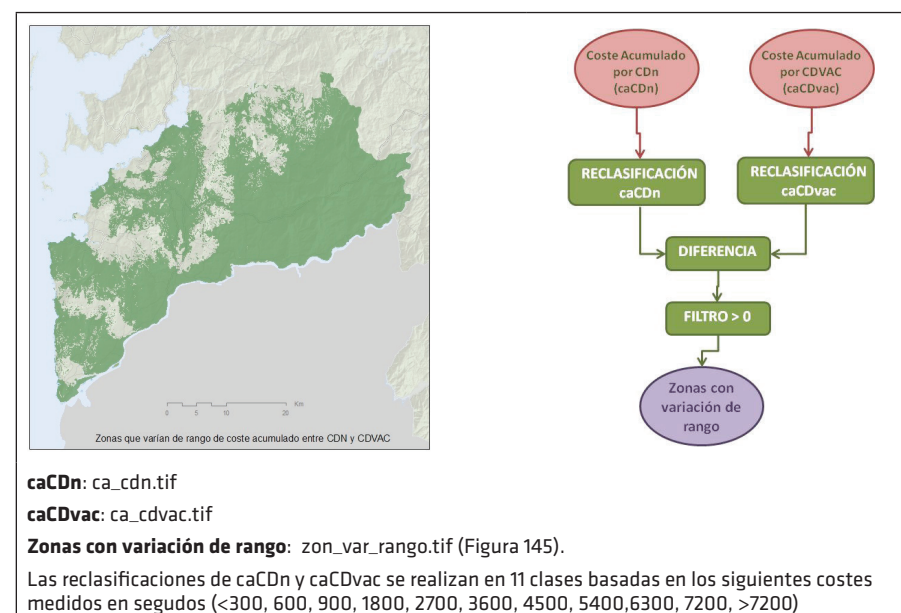


Figura 145. Zonas con variación del rango de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia sin considerar las VAC y el método de Coste Distancia considerando las VAC.

Tabla 30. Diferencias entre el coste calculado con CDN y con CDVAC en la superficie del ámbito de análisis.

CDN-CDVAC	CONTEO	% SUPERFICIE	VARIACIÓN MEDIA
Sin cambio	248	0,16%	0
< 5 min	11.130	7,14%	203,8
5 - 10 min	55.109	35,37%	448,7
10 - 15 min	43.854	28,15%	717,3
15 - 30 min	35.272	22,64%	1219,7
30 - 45 min	10.173	6,53%	1994,1
45 min - 1h	6	0,00%	2984,7
	155.792	100%	781,7

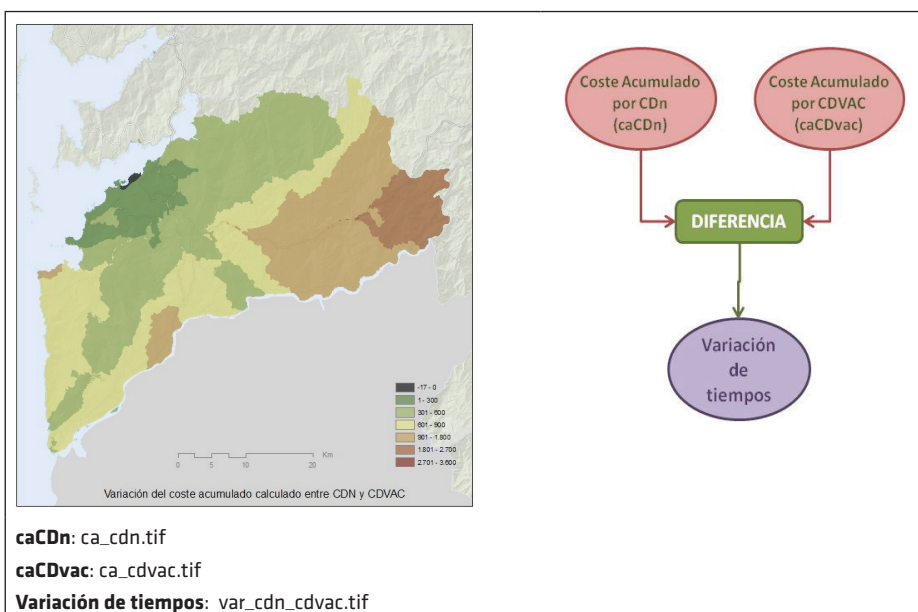


Figura 146. Zonas según la variación de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia sin considerar las VAC y el método de Coste Distancia considerando las VAC

6.1.4.3. Método de Suma de Costes Parciales

El primer método propuesto, como aportación de esta investigación para atender las especificidades de las VAC en cuanto a su repercusión en las comunicaciones viarias en una región, trata de atender de forma individualizada los tramos de los desplazamientos entre los puntos de inicio y fin de los trayectos, y la relación de estos con los enlaces de las VAC. Aunque este método usa el algoritmo Coste Distancia aplicado en los dos casos anteriores, el procedimiento planteado obliga a emplearlo en tres ocasiones de forma diferente para obtener el resultado final. En el método de Suma de Costes Parciales (SCP) se obtienen resultados intermedios en cada uno de estos tres cálculos, que deben ser tratados cuidadosamente para conseguir el coste acumulado final para conocer los tiempos de desplazamiento a un lugar (Figura 147).

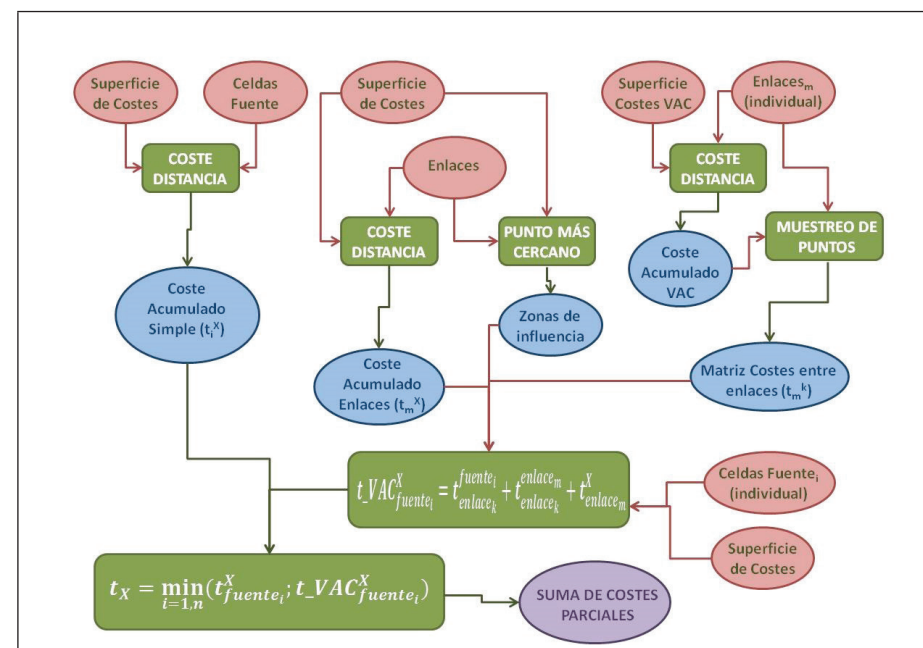


Figura 147. Diagrama de las operaciones espaciales necesarias para calcular el coste acumulado mediante el método de Suma de Costes Parciales.

Con los datos concretos de este ensayo (Tabla 31), se obtienen unos resultados que ofrecen una configuración en cierta medida similar al empleo de las VAC en el método de Coste Distancia que se analizó en el apartado anterior, aunque con diferencias destacables. Los costes acumulados también se reducen con respecto a la primera alternativa del ensayo de no considerar las VAC, pero en menor medida que en el caso anterior, consiguiendo disminuir en un 25% el valor medio de aquella (Tabla 32). El valor máximo obtenido con el método de Suma de Costes Parciales (SCP) llega a 8.803 segundos, un 0,85% más que en caso anterior (CDVAC), pero que sigue siendo menor que no considerar las VAC. Sin embargo, el valor medio calculado mediante SCP (1.845,5 seg) aumenta un 9% frente al valor medio del método CDVAC (1.692,7 seg), lógicamente al condicionar el uso de las VAC en los desplazamientos.

El método de SCP reduce apreciablemente el efecto de ramificación que generaba el trazado de las VAC en los bordes de cada franja de costes acumulados. Sin embargo con este método se aprecian espacios de menor coste, representados como islas, dentro de franjas de coste mayor. Esta singularidad con respecto a los métodos anteriores es motivada por considerar en los cálculos la presencia de algún enlace de una VAC. En las zonas cercanas a ese enlace se podrá acceder a las VAC, y por tanto llegar más rápido a la celda fuente que lugares más cercanos geográficamente, pero más distantes a un nodo de acceso a estas infraestructuras (Figura 148 y Figura 149).

Tabla 31. Capas empleadas en el procedimiento de Suma de Costes Parciales aplicado al ámbito de análisis.

DATOS DE ENTRADA
Superficie de Costes: scs_vigo_100.tif (Superficie de costes sin considerar la existencia de VAC en el ámbito de estudio)
Celdas Fuente: vigo_ciudad.tif
Superficie Costes VAC: scc_vac100.tif
Enlaces: la capa vectorial enlaces_vigo.shp debe rasterizarse de forma que cada enlace tenga una identificación única. Además es preciso descomponer los elementos de esta capa vectorial en capas vectoriales que contengan únicamente un enlace, con el que se trabajará en " Enlaces_m (individual) ", para lo cual también se requiere la rasterización de estos ficheros vectoriales.
DATOS CALCULADOS
Coste Acumulado Simple (t_i^x): ca_cdn.tif
Coste Acumulado Enlaces (t_m^x): ca_enlaces.tif
Coste Acumulado VAC: varios ráster, uno por enlace, de cuyo valores, interesa únicamente los recopilados en la Matriz de costes entre enlaces.
Zonas de influencia: zonas_enlaces.tif (Figura 155)
Matriz de costes entre enlaces (t_m^h): matriz_coste_entre_enlaces.csv
RESULTADO FINAL
Suma de Costes Parciales: ca_scp.tif (Figura 148)

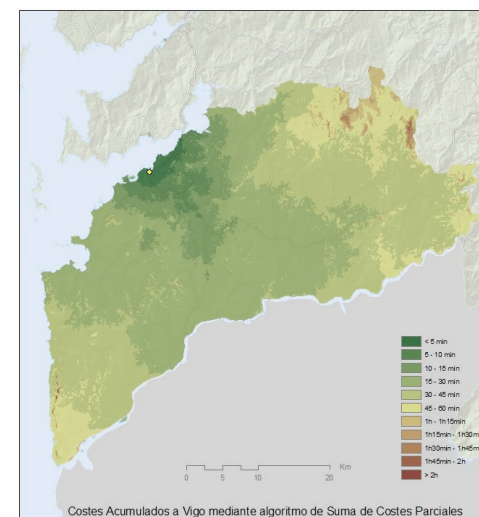


Figura 148. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Suma de Costes Parciales.

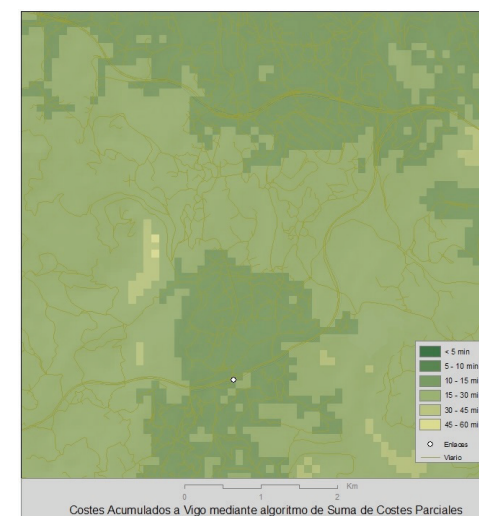


Figura 149. Detalle del coste acumulado calculado con el método de Suma de Costes Parciales.

La superficie con tiempos acumulados bajos también se incrementa respecto a no considerar las VAC, donde el área con tiempos menores a los 30 minutos sólo representaba el 28,9% del ámbito de análisis, frente al 52,1% de este cálculo, que como era de esperar, es menor al obtenido al considerar acceso libre en todo el trazado de las VAC, que casi alcanzaba el 60%. Las mayores diferencias se observan en estos rangos de menor tiempo, donde se constataba una superficie del 15,9% en CDVAC para zonas a menos de 15 min (Tabla 28), pasando al 11,1% en SCP (Tabla 32 y Figura 150).

La distribución del porcentaje de área cubierta en cada rango de tiempo y del valor de coste acumulado en ellos en este método SCP (Figura 151), adopta una configuración muy similar a la obtenida en el método CDVAC (Figura 144), con picos a los 30 minutos para el caso de la superficie y de 45 minutos para la suma de los costes acumulados calculados. En ambos casos los porcentajes alcanzados (40,9% y 40,6%, respectivamente) son menores a los obtenidos en el método CDVAC (42,9% y 41,1%).

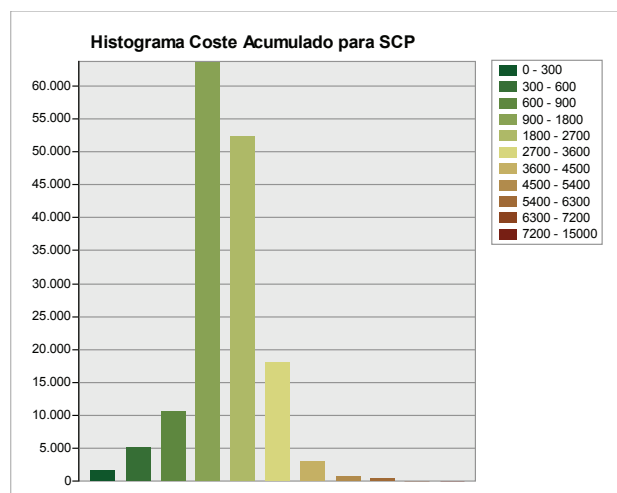


Figura 150. Histograma del coste acumulado calculado con el método de Suma de Costes Parciales para el ámbito geográfico de análisis.

Tabla 32. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Suma de Costes Parciales para el ámbito geográfico de análisis.

SCP	CONTEO	% CONTEO	MIN	MAX	RANGO	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA
< 5 min	1.657	1,06%	19	300	281	209,1	64,5	222	346.453	0,12%
5 - 10 min	5.141	3,30%	301	600	299	486,9	80,3	505	2.503.180	0,87%
10 - 15 min	10.546	6,77%	601	900	299	761,6	84,6	767	8.031.900	2,80%
15 - 30 min	63.756	40,92%	901	1.800	899	1.376,0	241,2	1.383	87.725.400	30,54%
30 - 45 min	52.417	33,64%	1.801	2.700	899	2.223,6	255,3	2.213	116.553.000	40,57%
45 min - 1h	17.972	11,53%	2.701	3.600	899	3.019,0	238,9	2.970	54.257.500	18,89%
1h - 1h 15min	3.055	1,96%	3.601	4.500	899	3.970,4	250,0	3.941	12.129.500	4,22%
1h15min - 1h30min	787	0,51%	4.501	5.395	894	4.841,8	254,6	4.784	3.810.520	1,33%
1h30min - 1h45min	278	0,18%	5.401	6.289	888	5.723,7	229,7	5.673	1.591.190	0,55%
1h45min - 2h	33	0,02%	6.311	7.042	731	6.591,2	198,3	6.590	217.509	0,08%
> 2h	13	0,01%	7.265	8.803	1.538	7.909,0	495,3	8.008	102.817	0,04%
TOTALES	155.655	100%	19	8.803	8.784	1.845,5	830,7	1.751	287.268.969	100%

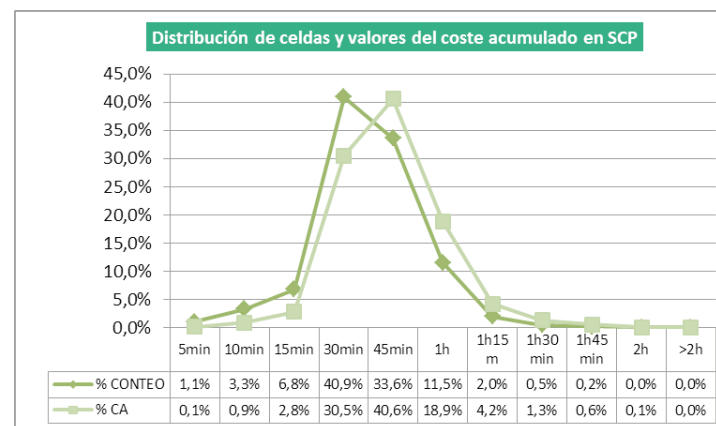


Figura 151. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Suma de Costes Parciales para el ámbito geográfico de análisis.

6.1.4.3.1. Análisis comparativo de los métodos SCP y CDVAC

Se aprecian claramente mayores similitudes entre los resultados alcanzados por el método de Coste Distancia considerando las VAC y el método de Suma de Costes Parciales, por lo que seguimos profundizando en la relación entre ambos métodos.

Al analizar la variación de superficie calculada entre ambos métodos, se constata que como media cada rango varía un 22,5%, si bien con el modelo de SCP

se reduce la superficie para las franjas de tiempo inferior a 30 minutos, pues el método CDVAC no presenta limitaciones para acceder a las VAC. También se aprecia cómo se aumenta el tamaño de las zonas mayores a la media hora. La mayor variación en este caso es el aumento en más del 53% para la zona entre 45 minutos y 1 hora (Tabla 33).

Tabla 33. Variación porcentual de superficie y costes acumulados en cada uno de los rangos de tiempo, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Suma de Costes Parciales.

CDVAC-SCP	% Variación superficie	% Variación suma
< 5 min	38,3%	37,9%
5 - 10 min	39,2%	36,2%
10 - 15 min	22,7%	22,6%
15 - 30 min	4,7%	3,1%
30 - 45 min	-7,0%	-7,5%
45 min - 1h	-53,3%	-53,9%
1h - 1h 15min	-23,3%	-22,9%
1h15min - 1h30min	-17,8%	-17,2%
1h30min - 1h45min	-27,5%	-27,6%
1h45min - 2h	-13,8%	-14,3%
> 2h	0,0%	0,1%
TOTALES	0%	-8,9%

La superficie total que varía de rango de tiempos acumulados entre usar el método de Coste Distancia considerando las VAC (CDVAC) o emplear la Suma de Costes Parciales (SCP), representa el 17,3% del ámbito de análisis (Figura 152), frente a casi el 75% que variaba de rango al considerar o no las VAC en el algoritmo Coste Distancia. Sin embargo, en esta ocasión volvemos a tener aproximadamente la misma cantidad de celdas que cambian de valor entre SCP y CDVAC. Sólo un 0,19% de las celdas conserva el mismo valor en los dos métodos, y en el resto de celdas se alcanza una variación máxima de 1.980 segundos de mayor tiempo de desplazamiento en SCP que en CDVAC, con una variación media de 153,9 segundos, y una desviación típica en las diferencias entre estos valores de 146,9 segundos (Figura 153). El coeficiente de variación se sitúa en este caso en el 95,5%, mostrando claramente la falta de homogeneidad de los valores.

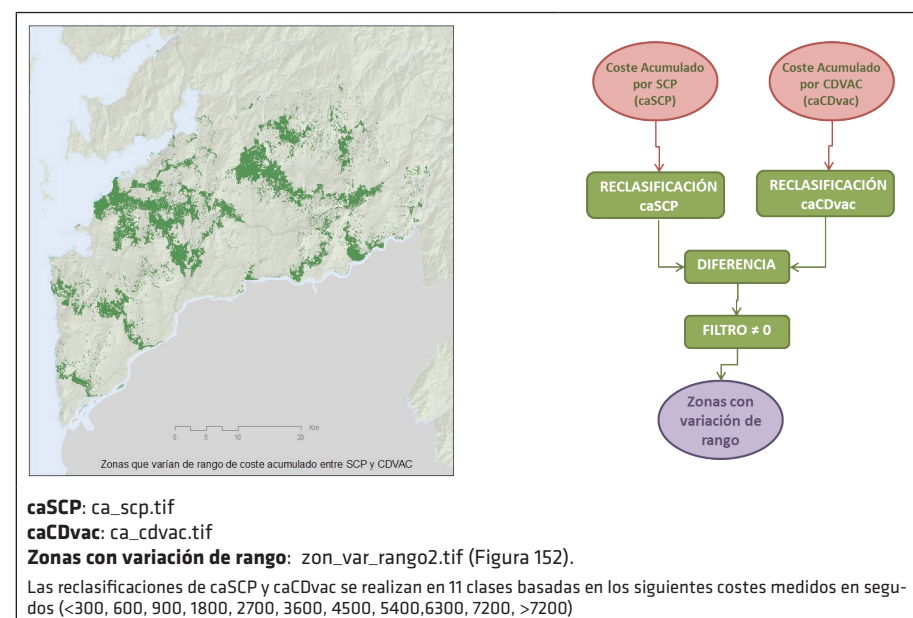


Figura 152. Zonas con variación del rango de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Suma de Costes Parciales y el método de Coste Distancia considerando las VAC.

Existen algunos lugares con menor valor en SCP, que aunque sólo representan el 1,9% de la superficie del ámbito de análisis, alcanzan hasta un máximo de variación de 1.381 segundos. Estos lugares se corresponden con puntos extremos de algunas zonas de influencia de los enlaces (Figura 154). Puesto que el método SCP obliga a entrar en las VAC en esos nodos, se verifica que en ciertas circunstancias eso genera menores tiempos de desplazamiento que acceder en cualquier punto del trazado de esas vías.

Aunque este hecho es significativo, la variación media de celdas con menor valor en SCP apenas tiene relevancia en general, pues se sitúa en 14,2 segundos, con una desviación típica de 61,8 segundos; frente a la media de 157,1 segundos y desviación estándar de 146,2 segundos de la zona con valor mayor en SCP. Se comprueba como la mayor parte de las celdas (84,4%) varían su coste en un rango de tiempos inferior a 5 minutos (Tabla 35).

Tabla 34. Diferencias entre el coste calculado con SCP y con CDVAC en la superficie del ámbito de análisis.

SCP-CDVAC	CONTEO	% SUPERFICIE
SCP menor	2.957	1,90%
Sin cambio	300	0,19%
< 5 min	131.364	84,39%
5 - 10 min	17.627	11,32%
10 - 15 min	3.202	2,06%
15 - 30 min	204	0,13%
30 - 45 min	1	0,00%
	155.655	100%

que se generan con los diferentes métodos, se ha preferido mantenerlo así, pese a constatar en un caso la falta en los datos de un enlace existente en la realidad. Este es el caso de la zona suroeste de la ciudad de Vigo, en la que al no considerar enlaces en el tramo de circunvalación, se establecen unas diferencias importantes en ese ámbito, como apreciamos en la Figura 154. En esa misma figura se aprecia como la zona con menor valor en SCP que en CDVAC (señalada en color rojo) coincide con la parte extrema de una zona de influencia de un enlace concreto.

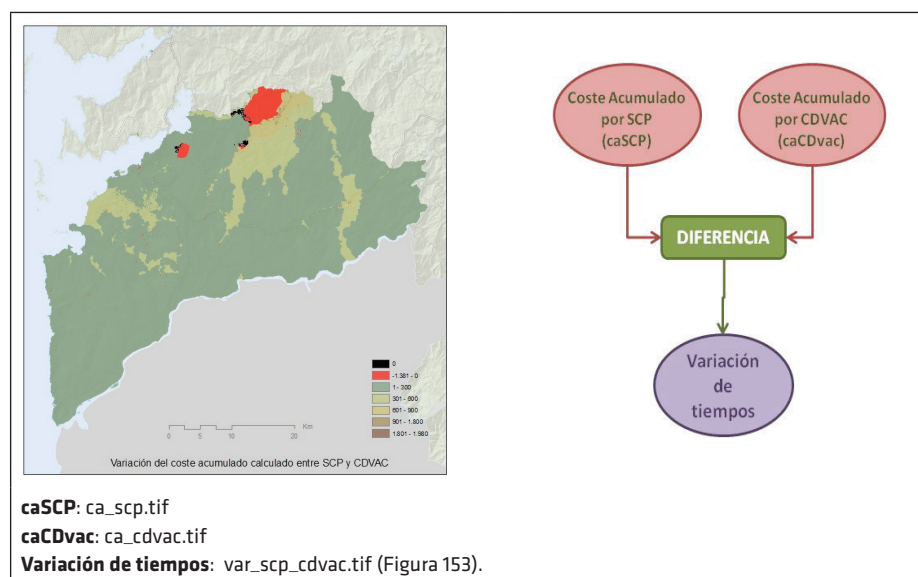


Figura 153. Zonas según la variación de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Suma de Costes Parciales y el método de Coste Distancia considerando las VAC

Las zonas con diferencias más significativas entre los dos métodos se deben a dos causas fundamentales. Por un lado la existencia o no de enlaces de las VAC. Por el carácter experimental de este ensayo, se ha considerado no hacer una exhaustiva localización de enlaces, por lo que alguna zona pudo quedar sin el servicio real que dispone actualmente. Pero para comprobar los efectos

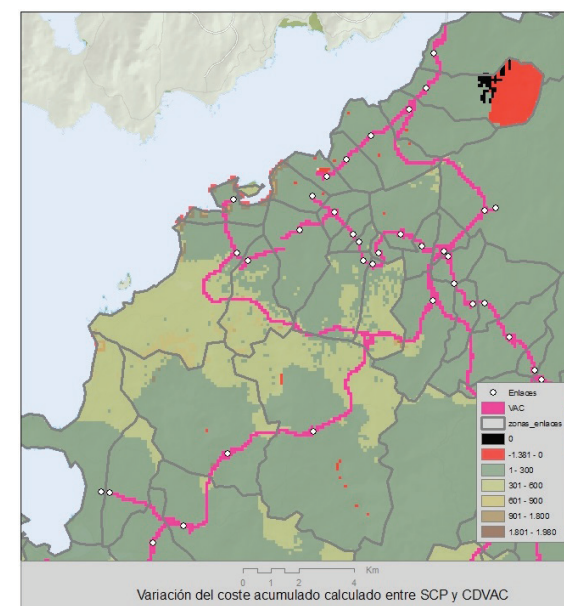


Figura 154. Detalle de la variación de costes acumulados entre SCP y CDVAC en la zona suroeste de la ciudad de Vigo.

La otra causa de las diferencias más grandes detectadas, se debe a que el método SCP contempla que cada enlace tenga una zona de influencia propia (Figura 155), que recoge los lugares que presentan un menor coste para acceder a ese enlace frente a cualquier otro de los considerados en el análisis. De esta manera, la metodología de cálculo de SCP impone que sólo se podrá acceder

a las VAC en estos enlaces, salvando la limitación del procedimiento anterior, donde se podría entrar en las VAC en cualquier punto de su trazado.

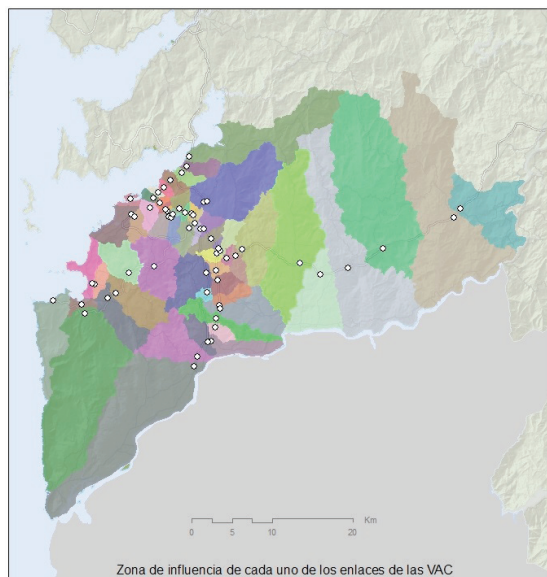


Figura 155. Zonificación de los enlaces de las VAC en el ámbito de análisis a partir del estudio del punto más cercano mediante el algoritmo de Coste Distancia.

Esta fortaleza del método para atender las singularidades de las VAC en las comunicaciones viarias, también origina uno de sus debilidades, pues se obliga a que los lugares dentro de una zona de influencia de un enlace, siempre vayan a ese enlace cuando deban incorporarse a una VAC. Sin embargo, dependiendo de dónde se sitúen las celdas fuente, podría ser más beneficioso, en cuanto a reducción de costes se refiere, acceder a otro enlace distinto, con otra zona de influencia diferente. Así surgen en los resultados finales, zonas con un importante salto en el valor del coste acumulado calculado, y que en realidad no debería producirse.

Si se hace un estudio de vecindad para analizar el rango de valores de celdas vecinas, distinguiendo las diferencias entre los métodos empleados, compro-

bamos la existencia de franjas con cambios bruscos en los costes acumulados calculados mediante el método de SCP. La ubicación de esas franjas coincide con los bordes de algunas de las zonas de influencia de los enlaces (Figura 156). Eso genera unas zonas claramente identificadas en el mapa de diferencias de costes acumulados para todo el ámbito de análisis, fundamentalmente en su mitad oriental (Figura 157), que no se corresponden con el comportamiento real de los desplazamientos sobre el territorio.

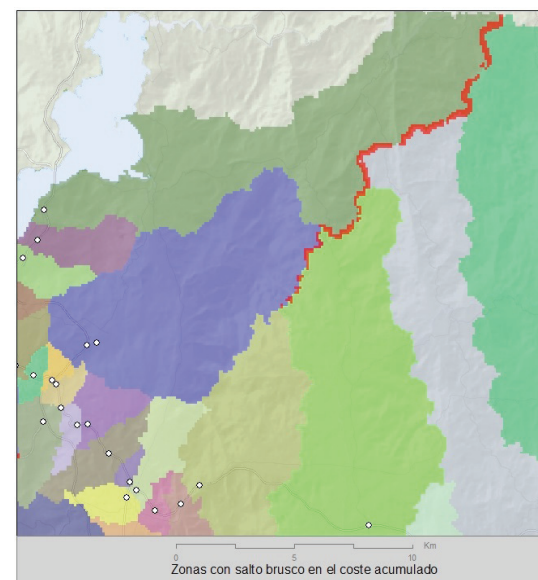


Figura 156. Localización de zonas con un cambio brusco en el valor del coste acumulado calculado con SCP. En este caso se resalta en rojo variaciones de más de 600 segundos en matrices de 3x3 celdas.

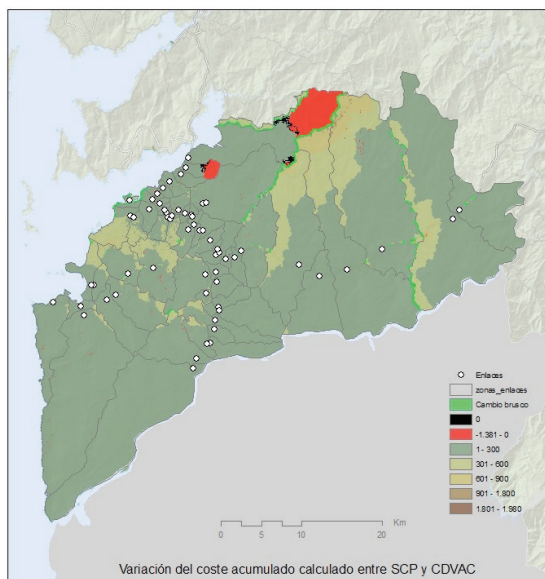


Figura 157. Identificación de las franjas con cambios bruscos en la variación de costes acumulados calculados con SCP o CDVAC. En este caso se visualiza en verde brillante las variaciones de más de 300 segundos en matrices de 3x3 celdas.

6.1.4.4. Método de Coste Distancia Condicionado

Para intentar paliar algunos de los inconvenientes detectados en el método de Suma de Coste Distancia, y además profundizar en nuevas posibilidades operativas con los SIG, se propone en este trabajo un nuevo procedimiento de cálculo denominado método de Coste Distancia Condicionado (CDC). Este método trata de atender los condicionantes que se plantean en los desplazamientos territoriales, incluyendo las especificidades que suponen las VAC en su conexión con el resto de la estructura viaria y demás elementos de su entorno.

Es necesario disponer de nuevos datos geográficos de entrada para ejecutar este modelo de accesibilidad, tal y como se detalló en el apartado 6.1.3.3. Además debe establecerse una relación de restricciones entre las zonas de desplazamiento consideradas, que en este ensayo se recoge en la Matriz de Con-

diciones de Desplazamientos propuesta en la definición del modelo (Tabla 26. Ejemplo de Matriz de Condiciones de Desplazamiento para el cálculo del Coste Acumulado Simple en el análisis viario de la accesibilidad territorial mediante el modelo de Coste Distancia Condicionado.).

Los resultados alcanzados con este método son visualmente muy similares a los obtenidos con el método de Coste Distancia considerando las VAC (CDVAC), reduciendo como era de esperar, el ancho de las franjas entorno a las vías de alta capacidad (Figura 158 y Figura 159), al restringir el acceso a la mismas a únicamente los enlaces identificados. Por este motivo nos centraremos más en el análisis sobre las diferencias y similitudes de los resultados alcanzados por ambos métodos (CDVAC y CDC).

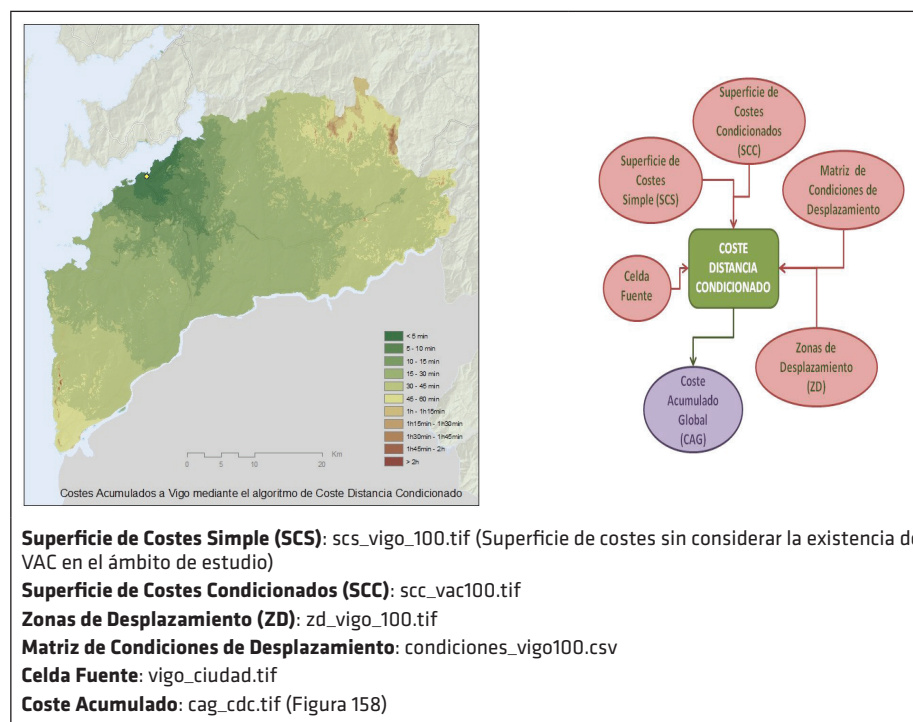


Figura 158. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Coste Distancia Condicionado.

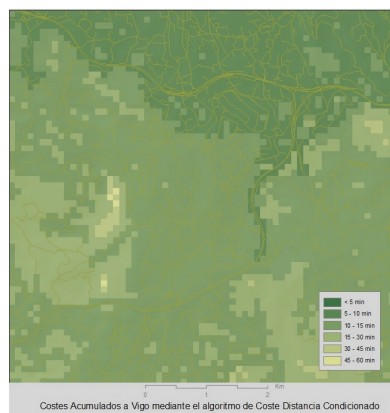


Figura 159. Detalle del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia Condicionado.

6.1.4.4.1. Análisis comparativo de los métodos CDC y CDVAC

La distribución del coste acumulado muestra claramente como los tiempos siguen concentrándose en zonas de rango inferior (Figura 160), donde se registra el 58,4% del ámbito con valor menor a 30 minutos, muy similar al obtenido con CDVAC (59,5%). De hecho, en este ensayo, la mayor parte de las cifras estadísticas de este modelo CDC, son prácticamente idénticas a las del método CDVAC. Aunque evidentemente aparecen diferencias, que comentaremos durante este apartado.

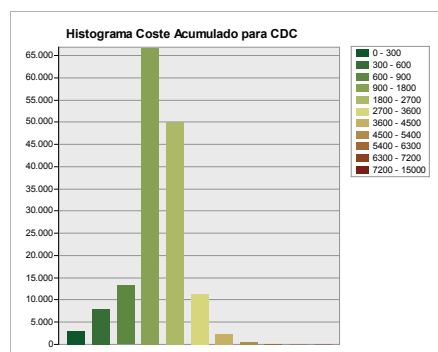


Figura 160. Histograma del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis.

El valor medio es 1,1% mayor en CDC, llegando a 1.695,7 segundos, y una desviación típica similar, de 814,1 seg. El coeficiente de variación es del 48%, muy similar al 48,8% obtenido con el valor medio y la desviación típica del método CDVAC. El valor máximo alcanzado es sin embargo menor, aunque muy cercano, pues sólo varía un 0,13% menor, hasta los 8.703 segundos (Tabla 35).

Tabla 35. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis.

CDC	CONTEO	% CONTEO	MIN	MAX	RANGO	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA
< 5 min	2.926	1,88%	7	300	293	195,2	69,6	204	571.210	0,20%
5 - 10 min	8.036	5,16%	301	600	299	467,2	84,8	473	3.754.440	1,31%
10 - 15 min	13.194	8,47%	601	900	299	758,5	87,1	759	10.008.100	3,48%
15 - 30 min	66.880	42,92%	901	1.800	899	1.349,0	250,2	1.345	90.223.300	31,41%
30 - 45 min	50.142	32,18%	1.801	2.700	899	2.223,6	253,9	2.219	111.493.000	38,81%
45 min - 1h	11.347	7,28%	2.701	3.600	899	3.004,3	235,4	2.955	34.090.200	11,87%
1h - 1h 15min	2.400	1,54%	3.601	4.500	899	3.977,6	249,5	3.945	9.546.270	3,32%
1h15min - 1h30min	618	0,40%	4.503	5.393	890	4.886,6	269,9	4.857	3.019.890	1,05%
1h30min - 1h45min	209	0,13%	5.401	6.292	891	5.714,5	224,0	5.681	1.194.340	0,42%
1h45min - 2h	27	0,02%	6.305	7.172	867	6.568,8	214,8	6.527	177.358	0,06%
> 2h	12	0,01%	7.241	8.703	1.462	7.948,2	424,3	7.916	95.378	0,03%
TOTALES	155.791	100%	7	8.703	8.696	1.695,7	814,1	1.605	264.173.486	100%

Esta similitud se muestra también en el gráfico de la Figura 161, que es casi exacto al correspondiente al método CDVAC (Figura 144). La comparativa entre las distribuciones del coste acumulado calculado con los cuatro métodos de accesibilidad considerados en este ensayo, muestra claramente esta igualdad entre CDVAC y CDC frente a los otros métodos (Figura 162).

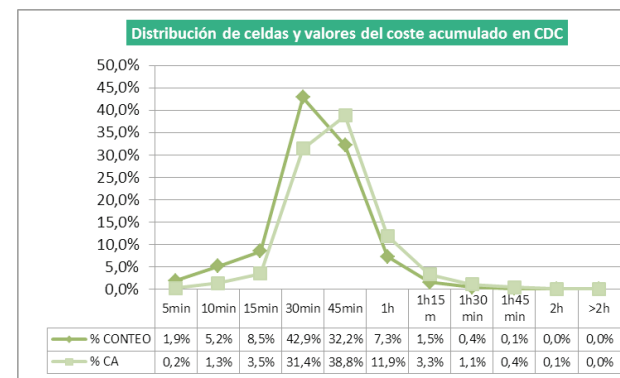


Figura 161. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis.

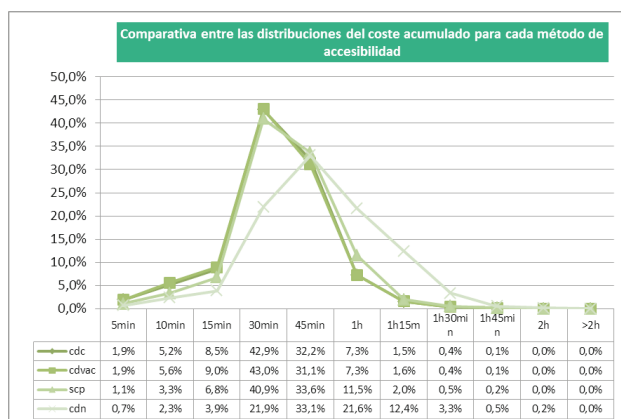


Figura 162. Gráfico comparativo entre las distribuciones del coste acumulado calculado con los cuatro métodos de accesibilidad considerados.

Al analizar la variación de superficie en los diferentes rangos de tiempo establecidos, se comprueba como hay una variación media del 3,4% del tamaño de cada rango en función de usar el método CDVAC o CDC. Destacan las tres franjas de menor tiempo, ya que para costes inferiores a 15 minutos, el método CDVAC consigue superficies más amplias que el método CDC, debido a la posibilidad de acceder a las VAC en cualquier punto. Esta circunstancia hace que en estos tres primeros rangos, la diferencia media de superficies entre los dos métodos sea superior al 5%, mientras que en el resto de rangos no llega al 3% (Tabla 36). Los intervalos entre 30 minutos y una hora, presentan en este ensayo una superficie mayor en CDC que la obtenida por CDVAC.

Tabla 36. Variación porcentual de superficie y costes acumulados en cada uno de los rangos de tiempo, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Coste Distancia Condicionado.

CDVAC-CDC	% Variación superficie	% Variación suma
< 5 min	1,0%	4,8%
5 - 10 min	8,4%	7,5%
10 - 15 min	5,6%	6,0%
15 - 30 min	0,2%	0,4%
30 - 45 min	-3,6%	-4,2%
45 min - 1h	-0,1%	0,0%
1h - 1h 15min	1,8%	1,9%
1h15min - 1h30min	4,6%	4,4%
1h30min - 1h45min	0,9%	1,0%
1h45min - 2h	3,6%	3,4%
> 2h	7,7%	7,2%
TOTALES	0%	-0,2%

La superficie total que varía de rango de tiempos acumulados entre usar el método de Coste Distancia considerando las VAC (CDVAC) o emplear el Coste Distancia Condicionado (CDC), representa el 5,2% del ámbito de análisis (Figura 163). Un 0,76% de las celdas no varía su coste acumulado. Y el 53,5% obtiene un menor valor con CDC (Tabla 37), aunque la variación media en este caso es de sólo 18,9 segundos, y una desviación típica de 11,9 seg (el coeficiente de variación sube al 63%), y un máximo de variación que únicamente alcanza los 57 segundos. Podríamos decir por tanto que en general, casi un 55% de las celdas (concretamente un 54,26%) no tiene una diferencia de coste acumulado apreciable entre los dos métodos, para este caso concreto (Figura 164).

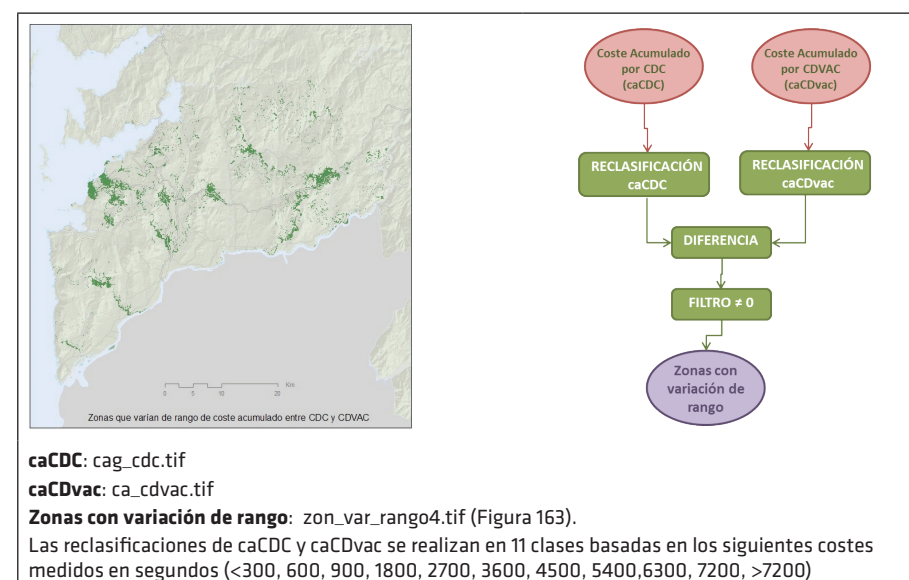


Figura 163. Zonas con variación del rango de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicional y el método de Coste Distancia considerando las VAC, para este ámbito de estudio.

Aunque la variación media global en valor absoluto, nos ofrece un valor de 38,5 segundos, en el 45,74% de la superficie restante, donde los costes acumulados calculados por CDVAC son menores que con CDC, la variación media

es de 62,4 segundos, con una desviación típica de 71,1 seg, y por tanto, un coeficiente de variación del 113,9%. La diferencia máxima alcanza el valor de 2.853 segundos. Sin embargo, las celdas con valores que sobrepasan los 300 segundos de diferencia, apenas llegan al 0,65%. Y a partir de los diez minutos de variación (600 segundos) las diferencias son prácticamente intrascendentes, pues sólo representan el 0,03% de la superficie (Tabla 37).

Tabla 37. Diferencias entre el coste calculado con CDC y con CDVAC en la superficie del ámbito de análisis.¹⁴³

CDC-CDVAC	CONTEO	% SUPERFICIE	VARIACIÓN MEDIA	% VARIACION MEDIA
CDC menor	83.349	53,50%	-18,9	-1,9%
Sin cambio	1.188	0,76%	0	0,0%
< 5 min	70.234	45,08%	57,7	4,2%
5 - 10 min	968	0,62%	355,2	19,4%
10 - 15 min	31	0,02%	696,1	62,6%
15 - 30 min	16	0,01%	1198,7	55,6%
30 - 45 min	4	0,00%	1990,2	94,2%
45 min - 1h	1	0,00%	2853	150,0%
	155.791	100%	38,5 seg (v. absoluto)	4,4% (v. absoluto)

¹⁴³ Existen mínimas diferencias en cuanto al número de celdas totales con valor no nulo entre los resultados de los diferentes métodos de cálculo empleados, debidos a ajustes en los bordes de ciertos resultados intermedios de los geoprocursos realizados. En cualquier caso, la diferencia es tan pequeña que no se considera preciso rehacer los cálculos con nuevos ajustes en los datos y en las operaciones para evitar esta circunstancia.

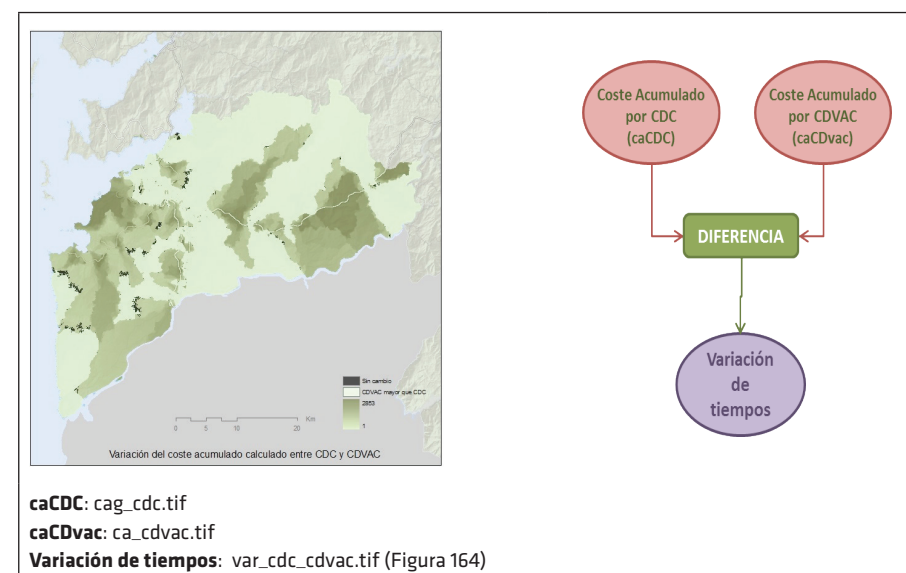


Figura 164. Zonas según la variación de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicionado y el método de Coste Distancia considerando las VAC

Si nos fijamos en el porcentaje de variación del coste acumulado calculado entre ambos métodos con respecto al valor de CDVAC, se aprecia como en global hay una variación del 4,4% en valor absoluto (en algunos casos las celdas tienen valores mayores en CDC y en otros casos menores). Cuando CDC obtiene valores menores que CDVAC, el porcentaje de variación es pequeño, pues no llega al 2% del coste acumulado calculado con CDVAC. Cuando la variación entre CDVAC y CDC es menor a los 5 minutos, el porcentaje se eleva al 4,2%. Y en el intervalo entre 5 y 10 minutos, el porcentaje casi alcanza el 20%. Para intervalos mayores, los porcentajes aumentan, aunque el número de celdas en los que se producen esas diferencias son prácticamente insignificantes con respecto al resultado global. El porcentaje de variación máxima obtenido en una celda es del 240%, situándose estos valores altos en borde exteriores de los trazados de VAC. En la Figura 165 se aprecia como las diferencias más importantes se producen entre los enlaces que presentan una separación mayor entre ellos.

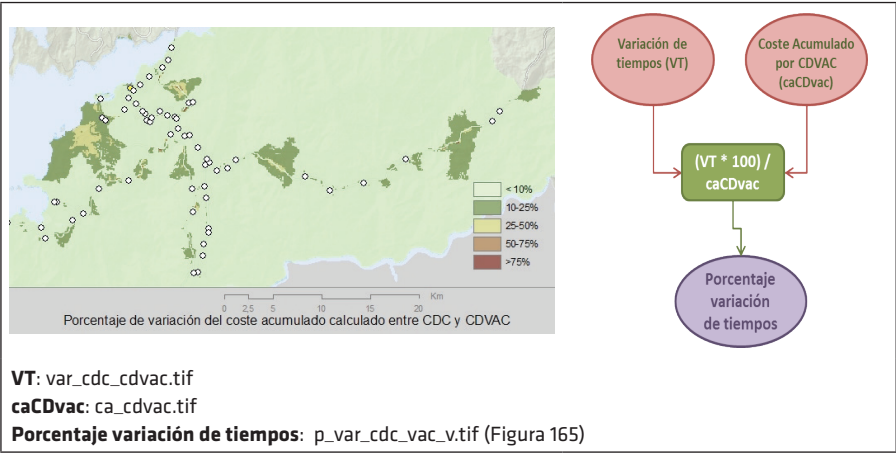


Figura 165. Zonas según el porcentaje de la variación de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicionado y el método de Coste Distancia considerando las VAC

Un 45% de las celdas cuenta con una variación menor a los 5 minutos. En ese rango, el valor medio de la diferencia entre los costes acumulados calculados con CDC y con CDVAC se sitúa en 57,7 segundos, con una desviación típica de 55,5 segundos, y el coeficiente de variación se reduce en esta franja al 96,2%. Si analizamos lo que ocurre en diferencias de un minuto dentro de ese intervalo, se aprecia como los dos primeros minutos representan casi el 90% de la superficie de esa franja. Las diferencias entre los valores calculados por CDC y por CDVAC van aumentando su porcentaje con respecto al valor de CDVAC a medida se aumenta esa variación de costes. Pasamos de 1,2% en el primer minuto al 15,5% en el cuarto minuto, para descender en el quinto a 14,1% (Tabla 38).

Tabla 38. Diferencias de costes acumulados entre 0 y 5 minutos, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Coste Distancia Condicionado.

CDC-CDVAC	CONTEO	%AREA 0-300	%AREA TOTAL	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA	% VAR
0-60	41.385	58,9%	26,6%	21,3	16,8	17	880.778	21,7%	1,2%
60-120	20.858	29,7%	13,4%	84,0	15,7	80	1.751.640	43,2%	6,3%
120-180	5.204	7,4%	3,3%	152,3	16,4	155	792.692	19,6%	13,8%
180-240	1.895	2,7%	1,2%	204,8	18,4	203	388.051	9,6%	15,5%
240-300	892	1,3%	0,6%	269,8	19,5	270	240.621	5,9%	14,1%
TOTALES	70.234	100%	45,1%	57,7	55,5	42	4.053.782	100%	4,2%

Si vemos la clasificación de estas diferencias de costes en el intervalo 0-300 segundos, se observa como las mayores variaciones se originan cuando la distancia entre los enlaces se incrementa (Figura 166), validando la correcta ejecución del método CDC. Para distancias entre enlaces supera los 3-5 kilómetros las diferencias empiezan a ser significativas. Y cuando las distancias se acercan o superan los 10 km, las variaciones ya son importantes. Aunque en este análisis también tiene influencia notable la orografía y la estructura viaria de la red de carreteras convencionales entre ambos nodos.

Si atendemos al intervalo entre 60 y 300 segundos, que representa un 18,5% de la superficie total del ámbito de análisis, el valor medio se eleva a 110 segundos, con una desviación similar en torno a los 49,5 segundos. En ese rango, el coeficiente de variación se reduce hasta el 45%, y las diferencias medias entre ambos métodos suponen aproximadamente el 8,5% del coste acumulado calculado con CDVAC, con una desviación de 6,8.

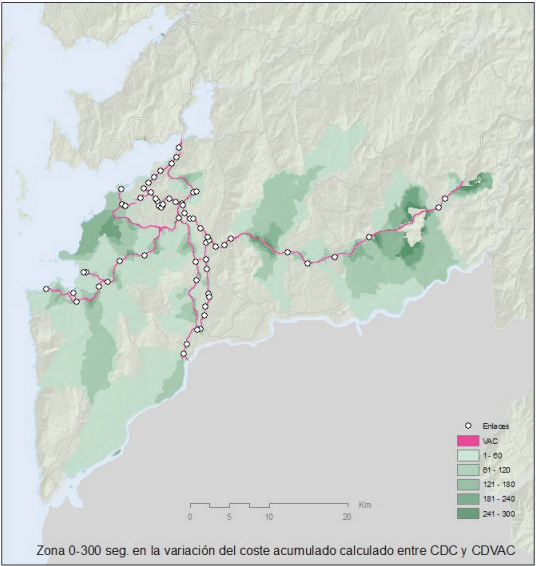


Figura 166. Clasificación del intervalo entre 0 y 300 segundos en la diferencia de costes acumulados calculados según el método CDC y el método CDVAC.

Si para ese intervalo hasta los 5 minutos, estudiamos como varía la diferencia de costes acumulados calculados en ambos métodos en función de la distancia con respecto al trazado de las VAC (Figura 167), observamos como a partir del cuarto kilómetro se produce un descenso en estas diferencias. Durante los primeros cinco kilómetros las diferencias se mantienen en cifras superiores a la media del intervalo menor a 5 minutos, que se situaba en 57,7 segundos, y con una desviación típica alta (Tabla 39) como se caracteriza este intervalo de tiempos. A partir de una distancia de seis kilómetros con respecto al trazado de las VAC, estos valores medios descienden, si bien, existe un repunte en la franja correspondiente al kilómetro siete (Figura 168).

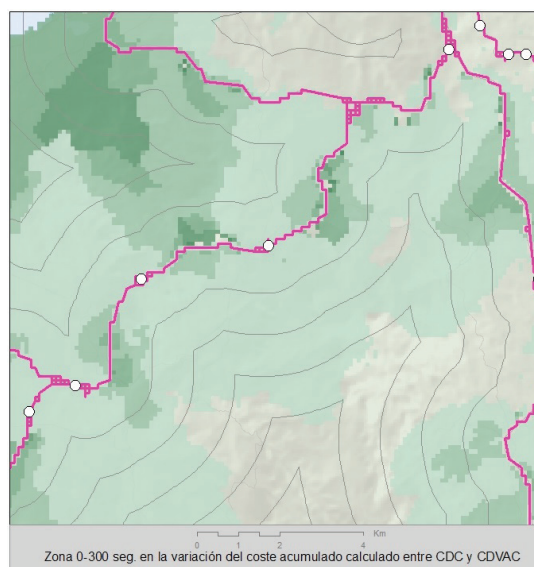


Figura 167. Detalle de análisis de variaciones de la diferencia de coste acumulado calculado entre CDC y CDVAC en función de la distancia al trazado de las VAC.

Tabla 39. Variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.

Distancia (Km)	Dif. media (seg)	Desv. Típica (seg)	Coef. Variación
1	68,3	62,8	92,0%
2	66,8	65,7	98,3%
3	67,9	67,2	98,9%
4	68,1	64,3	94,5%
5	58,0	50,4	86,9%
6	54,3	34,7	63,9%
7	57,2	29,2	51,0%
8	54,0	28,8	53,3%
9	45,3	27,7	61,2%
10	40,9	28,8	70,4%

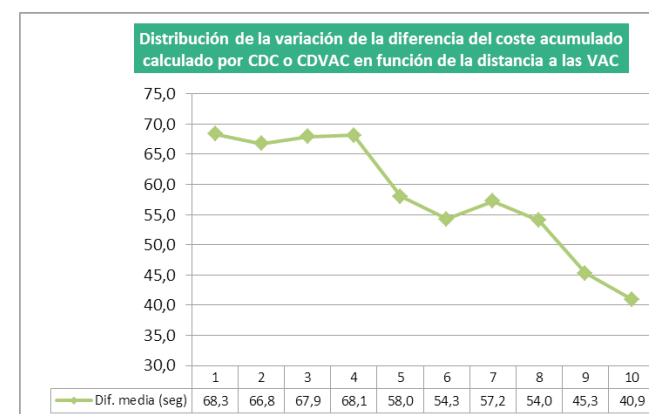


Figura 168. Gráfico de la distribución de la variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.

Si atendemos al porcentaje que supone esa diferencia con respecto al valor calculado con el método de Coste Distancia considerando las VAC, vemos como desciende a medida que nos separamos de las VAC. Las variaciones del coste acumulado calculado con el método CDC en el primer kilómetro limitante con el trazado de las VAC representan casi un 8% con respecto al coste acumulado calculado por CDVAC. Y en el segundo kilómetro, con un porcentaje de 5,3%, también se supera al porcentaje global del 4,4% obtenido en todo el

ámbito de análisis, igualándose este en el tercer kilómetro de separación del trazado de las VAC (Tabla 40 y Figura 169).

Tabla 40. Porcentaje de la diferencia de costes acumulado entre los métodos CDC y CDVAC, con respecto al valor del coste acumulado para CDVAC, en función de la distancia al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.

Distancia (Km)	% Dif. media (seg)	Desv. Típica (seg)	Coef. Variación
1	7,8	8,5	109,7%
2	5,3	6,2	117,0%
3	4,4	5,2	118,8%
4	4,3	5,2	120,2%
5	3,1	3,5	112,9%
6	2,6	2,0	79,6%
7	2,5	1,7	69,1%
8	2,2	1,7	77,3%
9	1,9	1,6	84,2%
10	1,7	1,5	88,2%

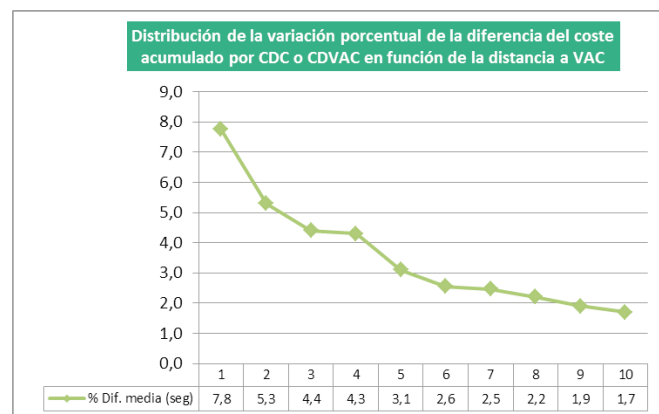


Figura 169. Gráfico de la distribución de la variación porcentual de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.

Si analizamos cómo varían los cálculos de costes acumulados en cada Zona de Desplazamiento entre operar con CDC y CDVAC, observamos como la variación media de los cambios son similares en el Terreno y en las Carreteras Convencionales, mientras que en el trazado de las VAC apenas hay variación, como era de

esperar. Los coeficientes de variación entre la media y la desviación típica muestran la disparidad de valores resultante en cada una de las zonas (Tabla 41).

Tabla 41. Variación media de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la Zona de Desplazamiento.

ZD_var_cdc_cdvac_100	CONTEO	MÁXIMO	MEDIA	STD	COEF. VARIACIÓN
1 - Terreno	61.001	2.853	18,4	72,5	394,4%
2 - Carretera	89.785	506	19,5	58,1	297,8%
3 - VAC	867	135	0,5	23,8	4617,6%
4 - Enlace	4.138	561	-5,3	18,9	-359,2%
TOTALES	155.791	2.853	18,3	63,5	347,0%

Los Enlaces presentan menores costes acumulados en este ensayo mediante el cálculo con CDC debido a los permisos que se otorga en estos espacios para acceder a las VAC. Los valores más altos en la diferencia entre los costes acumulados calculados en ambos métodos se encuentran en la ZD del Terreno (máximo en 2.853 segundos), y los más bajos en las VAC (máximo en 135 segundos). Tanto la ZD de las carreteras convencionales como de los enlaces alcanza máximas diferencias superiores a los 500 segundos. El porcentaje de variación media en cada ZD es de 1,0% para el Terreno, el 1,2% para las Carreteras convencionales, el 0,3% para las VAC y del -2,6% para los Enlaces.

Los análisis de los valores de los costes acumulados calculado por el método de CDC diferenciados por la Zona de Desplazamiento muestran como la el Terreno y las Carreteras convencionales tienen costes acumulados medios cercanos, al igual que sucede entre las VAC y los enlaces (Tabla 42).

Tabla 42. Análisis de los valores del coste acumulado calculado (en segundos) por CDC, en función de la Zona de Desplazamiento.

ZD_cdc100	CONTEO	MÁXIMO	MEDIA	STD	COEF. VARIACIÓN
1 - Terreno	61.001	8.703	2.002,2	903,9	45,1%
2 - Carretera	89.785	4.045	1.543,4	665,7	43,1%
3 - VAC	867	1.878	853,1	431,2	50,5%
4 - Enlace	4.138	3.445	658,4	433,1	65,8%
TOTALES	155.791	8.703	1.695,7	814,9	48,1%

En los siguientes gráficos analizamos la distribución de las variaciones de tiempo entre los resultados obtenidos con el método CDC y CDVAC, tanto en la

diferencia en segundos como en el porcentaje que supone la variación (Figura 170). Estos valores se distribuyen en función de la distancia del punto considerado a uno de los enlaces de las VAC, que son los nodos donde se articula la circulación por este viario en el método CDC. En primer lugar apreciamos como las diferencias son mayoritariamente de signo positivo, es decir, que el método CDC ofrece resultados de coste acumulado más alto que el método tradicional. Las variaciones de signo negativo son prácticamente insignificantes, y sólo se aprecian porcentajes de variaciones significativos en distancias muy próximas a los enlaces, donde los costes acumulados son muy pequeños, con lo que los cambios son casi irrelevantes.

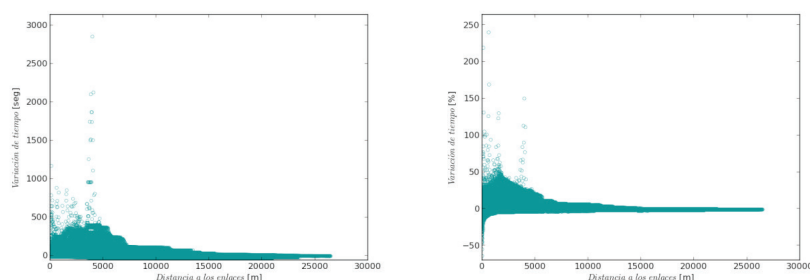


Figura 170. Variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para el acceso a Vigo.

Al estar representando más de 150 mil puntos, se muestra una aglomeración de puntos en ciertas zonas de la distribución, por debajo de los 500 seg de variación en tiempo y del 50% de porcentaje de cambio de valor. Y hasta los 5.000 metros de distancia a una VAC observamos puntos sueltos con valores superiores a esas cifras, llegando incluso a casi los 3.000 segundos de diferencia y a porcentajes de variación del coste acumulado superiores al 200% en algún caso.

Para analizar mejor cuál es el comportamiento, se cuantifica y se clasifica por colores el número de puntos coincidentes en estas dos gráficas (Figura 171). Puede apreciarse como la mayor cantidad se sitúa en cifras en tiempo cer-

canas a los 200 seg hasta aproximadamente los 6.000 metros de distancia a un enlace, y a partir de ahí este valor se va reduciendo. En el caso de los porcentajes, también se muestra unos valores medios entorno al 20% hasta aproximadamente los 6.000 metros (Figura 172).

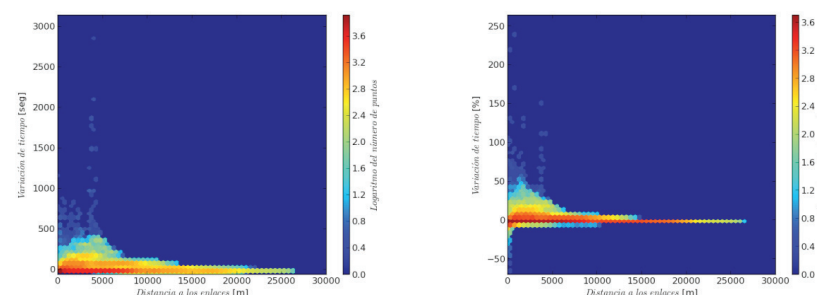


Figura 171. Distribución del número de puntos en función de la variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para el acceso a Vigo.

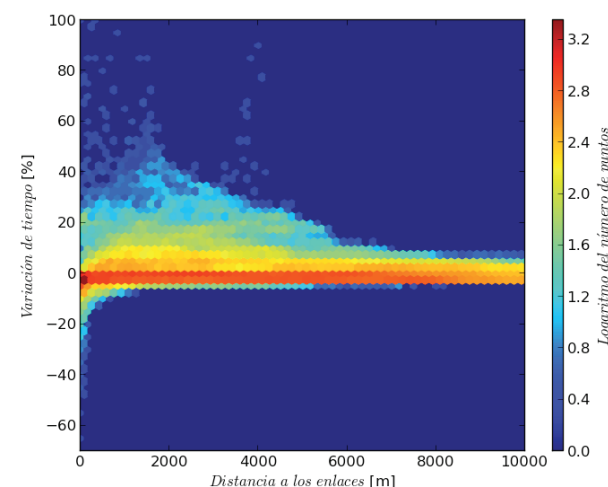


Figura 172. Distribución del número de puntos en función del porcentaje de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para el acceso a Vigo.



Si vemos el histograma de la distribución de las celdas con respecto a su distancia a los enlaces de las VAC, se demuestra como cerca del 80% se encuentran a una distancia inferior a los 10 kilómetros (Figura 173).

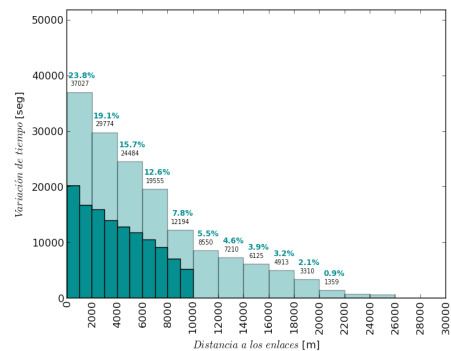


Figura 173. Histograma de la distribución del número de puntos en función de distancia a los enlaces a las VAC.

Si atendemos únicamente a la distribución en esa distancia (Figura 174) vemos como efectivamente, no hay ningún valor que llegue a una diferencia de 200 seg, a partir de aproximadamente los 7.500 metros. También se aprecia una distribución lineal horizontal de acumulación de puntos en las mismas proporciones, generando franjas horizontales a diferentes alturas. Ello es debido a que en cada uno de los enlaces se repite aproximadamente la misma variación de costes acumulados para las mismas distancias, con lo que se incrementa el número de puntos con igual valor en el par de parámetros considerados en el gráfico (variación, distancia).

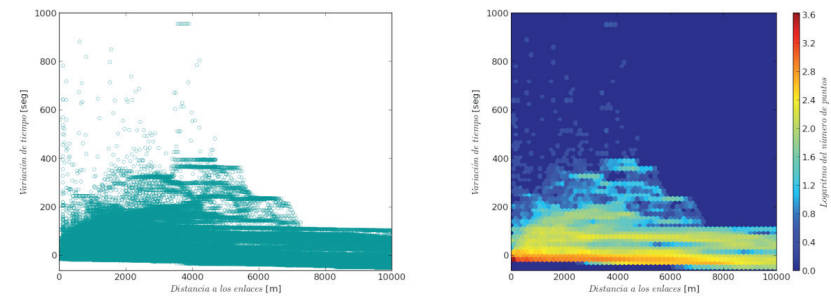


Figura 174. Distribución del número de puntos hasta una distancia de 10 km a un enlace VAC, en función de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC (figura de la izquierda) y cuantificación de los mismos (figura de la derecha), para el acceso a Vigo.

Se distingue más claramente este efecto si analizamos el detalle de la distribución de puntos hasta una distancia de 1 km y de 5 km (Figura 175). En la figura de la izquierda resalta la secuencia vertical de puntos en diferentes franjas. Ello se debe a que la resolución de las celdas en este análisis es de 100 metros, con lo que los valores de distancias no son continuos, sino que sólo existen unas cifras concretas y aparecen saltos entre dos cifras consecutivas. Esto se ve con mayor claridad en las distancias menores de 500 m.

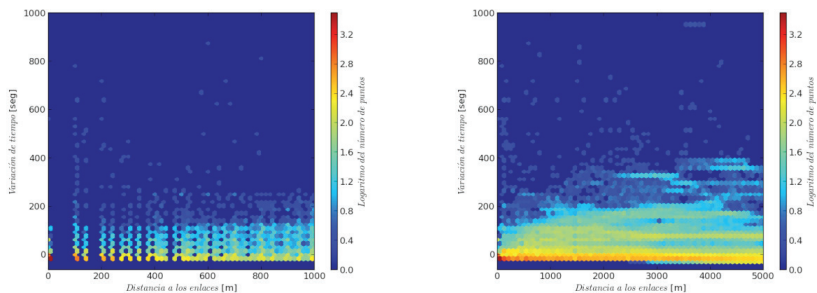


Figura 175. Distribución del número de puntos en función de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para el acceso a Vigo. La figura de la izquierda muestra estos valores hasta una distancia de 1 km a un enlace VAC. La figura de la derecha los muestra hasta una distancia de 5 km a un enlace VAC.

6.1.5. Comparación entre los tres métodos para calcular la accesibilidad a las capitales de comarca

Para intentar eliminar las singularidades que podría aportar la ubicación geográfica de una única celda fuente, se considera en el mismo ámbito de estudio las cuatro cabeceras comarcales que se distribuyen sobre él: Vigo, Tui, Ponteareas y A Cañiza.

Debido a los problemas asociados a la forma de cálculos los costes atendiendo a las VAC mediante el método de Suma de Costes Parciales, y a las notables diferencias existentes entre considerar o no las VAC en los cálculos, optamos por atender con más detalle a las diferencias entre el método de Coste Distancia considerando las VAC y el método de Coste Distancia Condicionado propuesto, calculando nuevamente los costes acumulados en los desplazamientos en todo el ámbito geográfico de análisis para esos dos métodos.

6.1.5.1. Método de Coste Distancia considerando las VAC

Aplicamos el método de Coste Distancia considerando en la Superficie de Costes la participación de las VAC, y permitiendo por tanto, para el cálculo de los desplazamientos a las cabeceras comarcales, enlazar con estas infraestructuras en cualquier punto de su trazado (Figura 176). Al considerar más puntos fuente en el ámbito de análisis para el cálculo de la accesibilidad, los valores de costes acumulados obtenidos disminuyen. La media de los costes se sitúa ahora en 983 segundos (Tabla 43), con una desviación estándar de 579,6 segundos.

El coste acumulado más alto obtenido es de 8.224 segundos, ligeramente inferior al calculado sólo para la ciudad de Vigo, y que se ubica nuevamente en una zona montañosa, por lo que pese a disponerse de una celda fuente más cercana geográficamente, los costes de acceso siguen siendo elevados. Por lo tanto, se hacen más notables las diferencias entre los valores extremos, por lo que el coeficiente de variación aumenta hasta alcanzar el 59%.

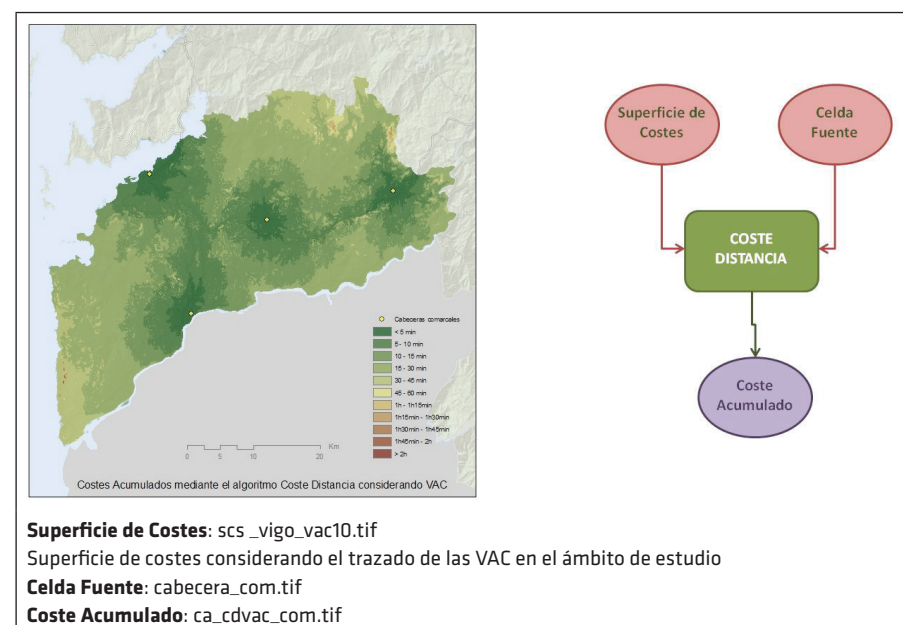


Figura 176. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde las cabeceras comarcales mediante el algoritmo de Coste Distancia considerando el Viario de Alta Capacidad.

Al aumentar el número de lugares fuente de desplazamientos, y que estos estén distribuidos por todo el ámbito de estudio, se alcanza el 90,4% de la superficie con costes acumulados menores a 30 minutos (Figura 177), frente al 60% si consideramos sólo Vigo. El rango entre 15 y 30 minutos es el que obtiene el valor más alto, tanto en superficie como en suma de costes obtenidos en este método (Figura 178).

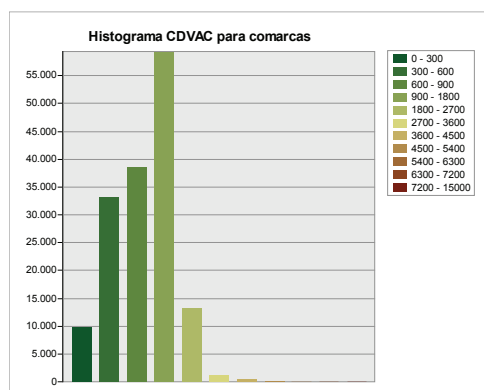


Figura 177. Histograma del coste acumulado calculado para las cabeceras comarcales con el método de Coste Distancia considerando las VAC para el ámbito geográfico de análisis.

Los valores medios de cada uno de los intervalos de tiempos considerados son muy similares al caso de considerar únicamente Vigo como celda fuente (Tabla 43). Como aspecto curioso, puede mencionarse que no se obtiene ningún valor en el intervalo entre una hora y tres cuartos y las dos horas, aunque es una circunstancia aparentemente excepcional de este cálculo con los datos de partida manejados.

Tabla 43. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos para las cabeceras comarcales con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, considerando las VAC.

CDVAC	CONTEO	% CONTEO	MIN	MAX	RANGO	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA
< 5 min	9.846	6,32%	0	300	300	204,7	68,0	217	2.015.960	1,32%
5 - 10 min	33.208	21,31%	301	600	299	465,7	84,1	473	15.466.300	10,09%
10 - 15 min	38.506	24,71%	601	900	299	750,8	86,3	751	28.908.400	18,86%
15 - 30 min	59.343	38,09%	901	1.800	899	1.241,1	250,6	1.185	73.648.100	48,06%
30 - 45 min	13.250	8,50%	1.801	2.700	899	2.074,7	212,9	2.029	27.489.400	17,94%
45 min - 1h	1.116	0,72%	2.701	3.600	899	3.098,2	275,8	3.070	3.457.580	2,26%
1h - 1h 15min	425	0,27%	3.601	4.493	892	3.958,0	227,4	3.928	1.682.160	1,10%
1h15min - 1h30min	92	0,06%	4.502	5.397	895	4.764,0	234,2	4.688	438.292	0,29%
1h30min - 1h45min	13	0,01%	5.423	6.245	822	5.661,4	290,4	5.522	73.598	0,05%
1h45min - 2h	0	0,00%	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
> 2h	9	0,01%	7.341	8.224	883	7.648,9	306,6	7.546	68.840	0,04%
TOTALES	155.808	100%	0	8.224	8.224	983,0	579,6	871	153.248.630	100%

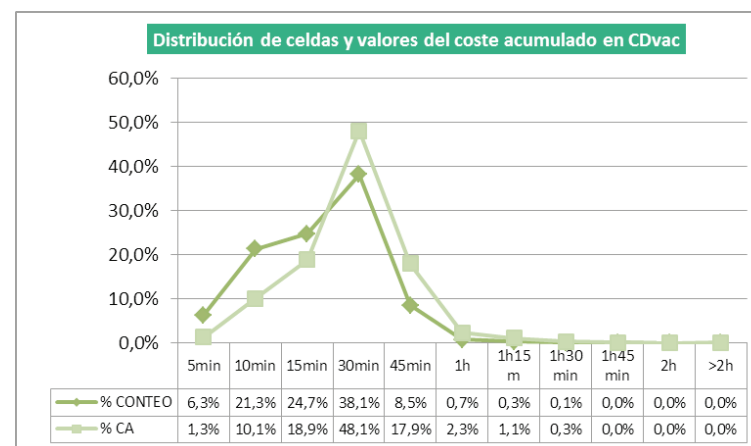


Figura 178. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, considerando las VAC.

6.1.5.2. Método de Suma de Costes Parciales

Este método de Suma de Costes Parciales restringe los lugares para acceder a las VAC, con lo que se obtienen costes mayores en general (Figura 179). El coste acumulado medio se eleva ahora a 1.138 segundos, un 16% mayor que en el caso anterior, con una desviación típica de 648,2 segundos (Tabla 44). El coeficiente de variación desciende un poco con respecto al método anterior, hasta el 57%, debido posiblemente al menor valor máximo obtenido ahora, con 6.688 segundos¹⁴⁴. Sin embargo, el sumatorio del coste acumulado en el ámbito de estudio aumenta ahora en un 15,6% respecto al método considerado antes, por las mayores dificultades impuestas en los desplazamientos por las VAC.

¹⁴⁴ No hemos podido detectar la causa de la disminución del valor máximo del coste acumulado en este caso para el método de Suma de Costes Parciales, pues en principio, no debería ser tan acusado. Sin embargo, las escasas celdas de mayor coste (las celdas con valores superiores a 5.400 apenas representan el 0,01% de la superficie), hace que cualquier pequeña variación en la composición del ráster de algunas de los procesos seguidos en el método de Suma de Costes Parciales, pueda originar bruscas variaciones en los resultados de algunas de estas celdas, como parece que puede ser este caso.

Nuevamente nos encontramos con un pico máximo de costes en la franja entre 15 y 30 minutos, con una caída muy significativa de los valores a partir de ese punto (Figura 180). Sin embargo, ahora debido al aumento de los costes, la superficie con valores menores a los 30 minutos, sólo alcanza los 84,6%.

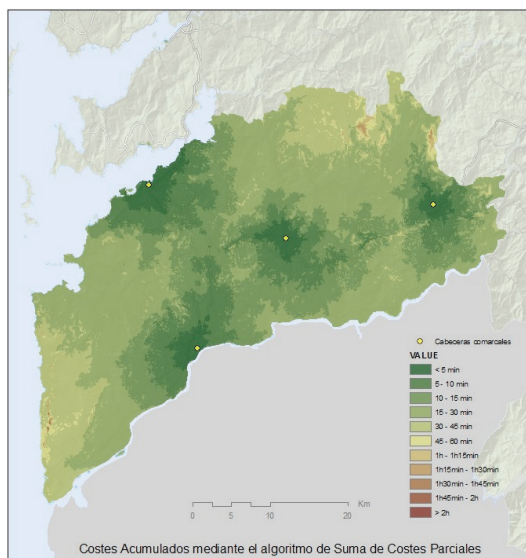


Figura 179. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde las capitales de comarca del ámbito de análisis, mediante el algoritmo de Suma de Costes Parciales.

Tabla 44. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos para las cabeceras comarcales con el método de Suma de Costes Parciales para el ámbito geográfico de análisis.

SCP	CONTEO	% CONTEO	MIN	MAX	RANGO	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA
< 5 min	7.360	4,73%	3	300	297	199,9	71,1	213	1.471.540	0,83%
5 - 10 min	23.502	15,10%	301	600	299	471,8	84,8	482	11.088.900	6,26%
10 - 15 min	35.908	23,06%	601	900	299	748,1	86,2	746	26.861.000	15,16%
15 - 30 min	64.890	41,68%	901	1.800	899	1.274,1	241,8	1.248	82.677.700	46,66%
30 - 45 min	21.054	13,52%	1.801	2.700	899	2.152,6	235,9	2.121	45.320.300	25,58%
45 min - 1h	2.253	1,45%	2.701	3.600	899	2.987,8	244,4	2.921	6.731.500	3,80%
1h - 1h15min	550	0,35%	3.601	4.498	897	3.943,4	255,5	3.880	2.168.860	1,22%
1h15min - 1h30min	157	0,10%	4.506	5.357	851	4.793,1	237,6	4.746	752.513	0,42%
1h30min - 1h45min	14	0,01%	5.451	6.282	831	5.851,5	264,5	5.837	81.921	0,05%
1h45min - 2h	4	0,00%	6.413	6.688	275	6.487,3	116,2	6.415	25.949	0,01%
> 2h	0	0,00%	0	0	0	0,0	0,0	0	0	0,00%
TOTALES	155.692	100%	3	6.688	6.685	1.138,0	648,2	1.012	177.180.183	100%

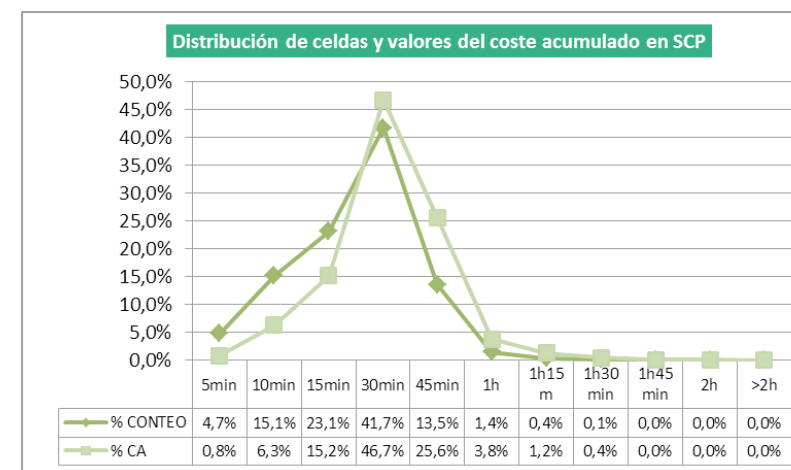


Figura 180. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado de las cabeceras comarcales con el método de Suma de Costes Parciales para el ámbito geográfico de análisis.

6.1.5.3. Método de Coste Distancia Condicionado

El resultado de aplicar el método de Coste Distancia Condicionado muestra un mapa similar al alcanzado por el algoritmo de Coste Distancia considerando las VAC, pero con una reducción del ámbito de influencia de estas infraestructuras en gran parte de su trazado (Figura 181). Se aprecia como al establecer las condiciones de desplazamiento que impiden acceder a estas infraestructuras en cualquier lugar, disminuye la zona con menor coste acumulado cercana a la geometría de las VAC. Debido fundamentalmente a ello, en general, se consiguen costes acumulados del orden de 1,8% mayores que el método anterior.

El coste acumulado medio aumenta hasta los 1.000,6 segundos, con una desviación típica de 572,2 segundos (Tabla 45). El valor máximo sin embargo, desciende ligeramente (0,23%) hasta alcanzar los 8.205 segundos. Como ya comentamos antes, estos costes acumulados máximos se ubican en zonas montañosas donde la fricción para llegar a ellos es muy alta, por lo que es difícil reducir su valor salvo que se sitúe una celda fuente muy próxima a ellos.

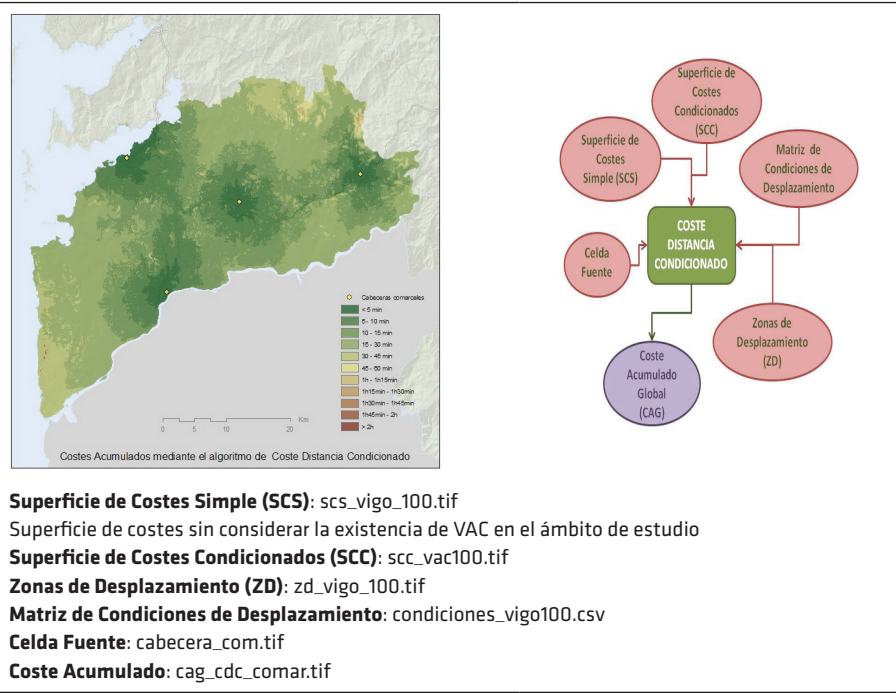


Figura 181. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde las cabeceras de comarca del ámbito geográfico de análisis, mediante el algoritmo de Coste Distancia Condicionado.

Tabla 45. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos para las cabeceras comarcales con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis.

CDC	CONTEO	% CONTEO	MIN	MAX	RANGO	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA
< 5 min	8828	5,7%	12	300	288	201,4	69,0	212	1778310	1,1%
5 - 10 min	30679	19,7%	301	600	299	470,5	84,2	480	14433800	9,3%
10 - 15 min	39467	25,3%	601	900	299	750,4	86,2	751	29616800	19,0%
15 - 30 min	61957	39,8%	901	1800	899	1245,1	248,8	1192	77144900	49,5%
30 - 45 min	13230	8,5%	1801	2700	899	2068,6	213,8	2019	27367100	17,5%
45 min - 1h	1094	0,7%	2701	3600	899	3101,0	274,0	3080	3392520	2,2%
1h - 1h 15min	425	0,3%	3605	4500	895	3967,3	226,6	3934	1686110	1,1%
1h15min - 1h30min	86	0,1%	4509	5384	875	4767,7	228,7	4688	410026	0,3%
1h30min - 1h45min	13	0,0%	5405	6227	822	5645,5	288,8	5540	73392	0,0%
1h45min - 2h	0	0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0,0%
> 2h	9	0,0%	7326	8205	879	7633,4	305,3	7531	68701	0,0%
TOTALES	155788	100%	12	8205	8193	1000,6	572,2	891	155.971.659	100%

Nuevamente los valores se concentran en la franja de tiempos menor a 30 minutos, donde se acumula el 90,5% de la superficie del ámbito estudiado,

ligeramente mayor que en el método CDVAC. Nuevamente el rango entre 15 y 30 minutos muestra un pico en el porcentaje de superficie cubierta y en el porcentaje del sumatorio de los costes acumulados calculados (Figura 182). En este caso, estos porcentajes son ligeramente superiores a los del método CDVAC, con 39,8% y 49,5% respectivamente para esa franja. Es decir, un 1,7% más para la superficie y un 1,4% más para la suma de los costes acumulados en ese intervalo.

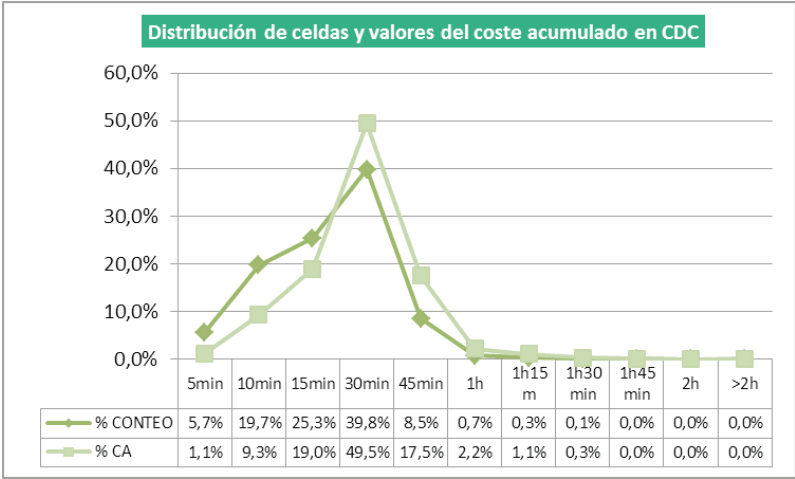


Figura 182. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado de las cabeceras comarcales con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis.

Se aprecia como la superficie de los dos rangos de menor coste (hasta 10 minutos) disminuye respecto al método de Coste Distancia con VAC, al eliminar la posibilidad de acceder a estas infraestructuras de altas prestaciones en cualquier punto de su trazado. Por ello cobra más importancia la superficie de los dos rangos siguientes (entre 10 y 30 minutos), manteniéndose prácticamente igual los valores para zonas superiores a la media hora de desplazamiento.

Aunque la variación media de la superficie de cada rango establecido calculado con el método de Coste Distancia considerando VAC y el método de Coste Distancia Condicionado, apenas llega al 3%, estas variaciones de superficie son

más significativas al considerar varias celdas fuente, a diferencia del ensayo anterior. En esta ocasión se obtienen diferencias de superficie que superan el 10% para el rango menor a 5 minutos, y la suma de costes en este intervalo obtiene una diferencia de casi el 12% entre los dos métodos de cálculo (Tabla 46). Hasta los 10 minutos se aprecia como el método CDVAC genera superficies de mayor extensión, sin embargo a partir de ese valor hasta los 30 minutos, el método CDC obtiene superficies más grandes. En los siguientes intervalos sólo hay variación significativa entre los 45 minutos y la hora, y entre la hora y cuarto y la hora y media. En ambos casos el método CDVAC ofrece superficies más extensas que el método CDC. Estos datos contrastan con los obtenidos con un solo punto como celda fuente, donde las variaciones eran más significativas en todos los intervalos. Se muestra como a mayor número de celdas fuente distribuidas en el ámbito de análisis, se incrementan las diferencias en las zonas cercanas a ellas, siempre que éstas estén influenciadas por la presencia de una VAC.

Tabla 46. Variación porcentual de superficie y costes acumulados en cada uno de los rangos de tiempo, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Coste Distancia Condicionado, para el análisis de las cabeceras de comarca en el ámbito de estudio.

CDVAC-CDC	% Variación superficie	% Variación suma
< 5 min	10,3%	11,8%
5 - 10 min	7,6%	6,7%
10 - 15 min	-2,5%	-2,5%
15 - 30 min	-4,4%	-4,7%
30 - 45 min	0,2%	0,4%
45 min - 1h	2,0%	1,9%
1h - 1h 15min	0,0%	-0,2%
1h15min - 1h30min	6,5%	6,4%
1h30min - 1h45min	0,0%	0,3%
1h45min - 2h	0,0%	0,0%
> 2h	0,0%	0,2%
TOTALES	0%	-1,8%

La superficie total que varía de rango de tiempos acumulados entre usar el método de Coste Distancia considerando las VAC (CDVAC) o emplear el Coste Distancia Condicionado (CDC), representa el 7% del ámbito de análisis (Figura 183), más que en el caso de considerar un solo lugar fuente de desplazamientos.

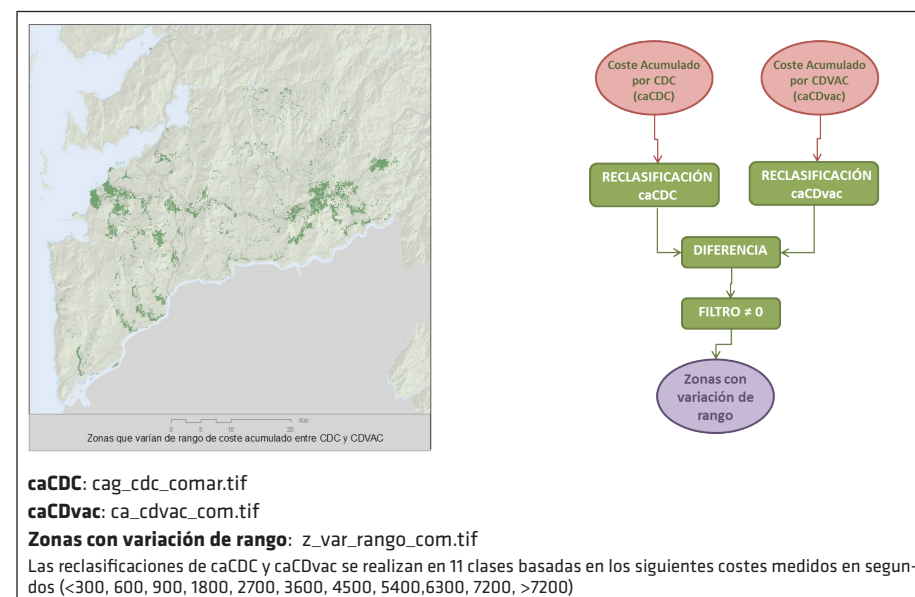


Figura 183. Zonas con variación del rango de tiempos acumulados a cabeceras comarcales, entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicional y el método de Coste Distancia considerando las VAC, para este ámbito de estudio.

Un 3,12% de las celdas no varía su coste acumulado, mucho más que en caso anterior. Y el 48,45% obtiene un menor valor con CDC (Tabla 47), aunque la variación media en este caso es de sólo 14,5 segundos, y una desviación típica de 10,5 seg (el coeficiente de variación sube al 72,4%), y un máximo de variación que únicamente alcanza los 53 segundos. Los valores son similares a los obtenidos con sólo Vigo como fuente de desplazamientos. En este caso podríamos decir que en general, un 51,5% de las celdas no tiene una diferencia de coste acumulado apreciable entre los dos métodos, para este caso concreto (Figura 185). Este porcentaje es un poco inferior al que se obtenía en el ensayo anterior.

Tabla 47. Diferencias entre el coste acumulado calculado para las cabeceras de comarca con CDC y con CDVAC en la superficie del ámbito de análisis.¹⁴⁵

CDC-CDVAC	CONTEO	% SUPERFICIE	VARIACIÓN MEDIA	% VARIACION MEDIA
CDC menor	75.473	48,45%	-14,5	-1,9%
Sin cambio	4.859	3,12%	0	0,0%
< 5 min	74.971	48,12%	48,7	6,8%
5 - 10 min	438	0,28%	341,0	60,9%
10 - 15 min	26	0,02%	712,7	102,3%
15 - 30 min	16	0,01%	1209,3	155,4%
30 - 45 min	5	0,00%	2132,6	194,0%
45 min - 1h	0	0,00%	0	0%
	155.788	100%	31,8 seg (v.absoluto)	7,2% (v. absoluto)

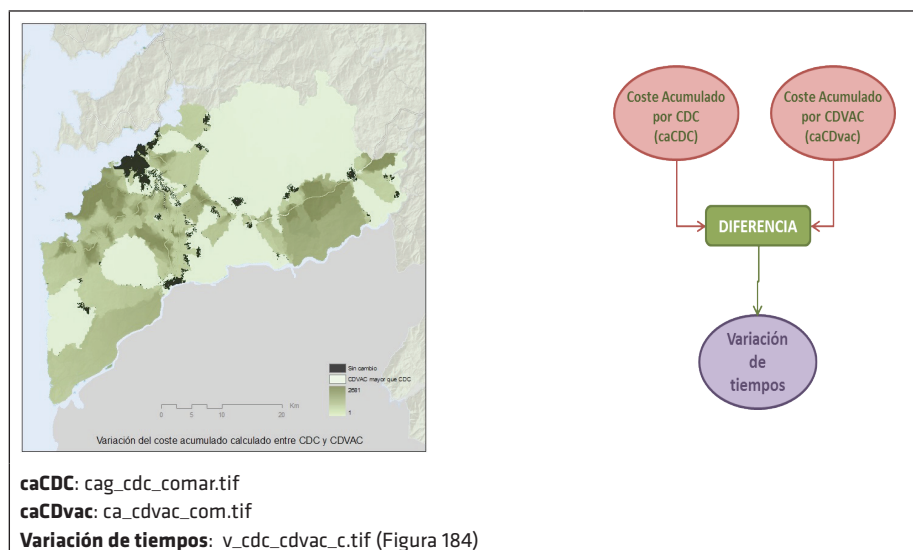


Figura 185. Zonas según la variación de tiempos acumulados a cabeceras comarcales entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicionado y el método de Coste Distancia considerando las VAC

¹⁴⁵ Existen mínimas diferencias en cuanto al número de celdas totales con valor no nulo entre los resultados de los diferentes métodos de cálculo empleados, debidos a ajustes en los bordes de ciertos resultados intermedios de los geoprosesos realizados. En cualquier caso, la diferencia es tan pequeña que no se considera preciso rehacer los cálculos con nuevos ajustes en los datos y en las operaciones para evitar esta circunstancia.

Aunque la variación media global en valor absoluto, nos ofrece un valor de 31,8 segundos, en el 48,4% de la superficie restante, donde los costes acumulados calculados por CDVAC son menores que con CDC, la variación media es de 51 segundos, con una desviación típica de 63,1 segundos, y por tanto, un coeficiente de variación del 123,7%. La diferencia máxima alcanza el valor de 2.681 segundos. Sin embargo, las celdas con valores que sobrepasan los 300 segundos de diferencia, apenas llegan al 0,31%. Observamos por tanto, que todos son valores similares a los obtenidos al considerar únicamente a Vigo como celda fuente del análisis.

Si nos fijamos en el porcentaje de variación del coste acumulado calculado entre ambos métodos con respecto al valor de CDVAC (Tabla 47), se aprecia como en global hay una variación del 7,2% en valor absoluto (en algunos casos las celdas tienen valores mayores en CDC y en otros casos menores). Este valor supone un aumento importante con respecto a considerar sólo un lugar fuente de desplazamiento. Cuando CDC obtiene valores menores que CDVAC, el porcentaje de variación sigue siendo pequeño, sin llegar nuevamente al 2% del coste acumulado calculado con CDVAC. Cuando la variación es menor a los 5 minutos, el porcentaje se eleva al 6,8%. Y en el intervalo entre 5 y 10 minutos, el porcentaje de variación casi alcanza más del 60%. Para intervalos mayores, los porcentajes aumentan, aunque el número de celdas en los que se producen esas diferencias son prácticamente insignificantes con respecto al resultado global. El porcentaje de variación máxima obtenido en una celda es del 537%, situándose estos valores altos en borde exteriores de los trazados de VAC (Figura 186).

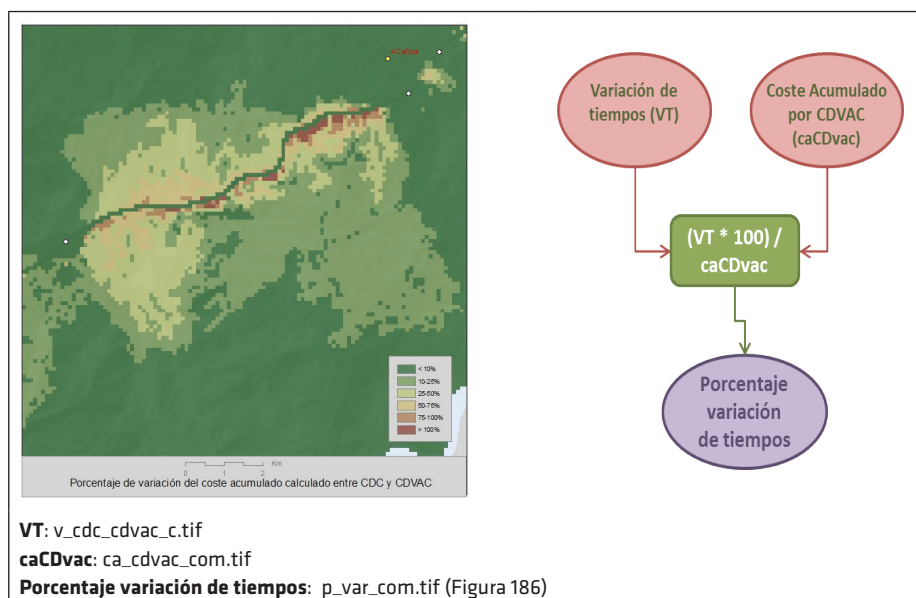


Figura 186. Detalle del porcentaje de variación del coste acumulado calculado entre CDC y CDVAC, con respecto al valor calculado por CDVAC, para el análisis de las cabeceras comarcales en el ámbito de estudio.

El intervalo de diferencias de valores entre los métodos hasta los cinco minutos, representa ahora el 48,1% de las celdas del ámbito. Al aumentar el número de celdas fuente, las distancias de los desplazamientos disminuyen, por lo que los tiempos calculados entre ambos métodos también descienden ligeramente comparados con el caso anterior. En este rango, el valor medio de la diferencia entre los costes acumulados calculados con CDC y con CDVAC se sitúa en 48,7 segundos, con una desviación típica de 52,4 segundos, y el coeficiente de variación aumenta al 107,5%.

Si se analiza lo que ocurre en las diferencias cada minuto en ese intervalo (Tabla 48), se aprecia como los porcentajes de distribución son similares al ensayo anterior, donde los dos primeros minutos representan aproximadamente el 90% de la superficie de esa franja. Las diferencias entre los valores calculados por CDC y por CDVAC van aumentando su porcentaje con respecto al valor de CDVAC a medida se aumenta esa variación de costes, pero en este

caso los porcentajes son mucho mayores. En el primer minuto el porcentaje de variación es de 2,5%, y de ahí va creciendo en cada minuto hasta el 41,4% que se obtiene en el quinto minuto.

Tabla 48. Diferencias de costes acumulados entre 0 y 5 minutos, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Coste Distancia Condicionado para las cabeceras comarcales.

CDC-CDVAC	CONTEO	%AREA 0-300	%AREA TOTAL	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA	% VAR
0-60	51.090	68,1%	32,8%	20,5	16,4	16	1.046.340	28,6%	2,5%
60-120	16.699	22,3%	10,7%	81,3	16,0	76	1.356.950	37,1%	11,3%
120-180	4.465	6,0%	2,9%	144,6	18,8	141	645.792	17,7%	23,1%
180-240	1.831	2,4%	1,2%	196,1	13,8	196	359.093	9,8%	29,2%
240-300	886	1,2%	0,6%	277,5	17,1	286	245.846	6,7%	41,4%
TOTALES	74.971	100%	48,1%	48,7	52,4	29	3.654.021	100%	6,8%

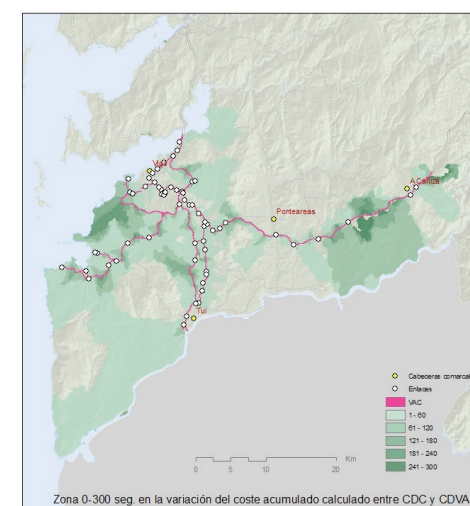


Figura 187. Clasificación del intervalo entre 0 y 300 segundos en la diferencia de costes acumulados calculados según el método CDC y el método CDVAC para las cabeceras comarcales en el ámbito de estudio.

Si estudiamos como varía la diferencia de costes acumulados calculados en ambos métodos en función de la distancia con respecto al trazado de las VAC, para el intervalo de tiempo hasta los 5 minutos, observamos dos escalones, uno correspondiente hasta el cuarto kilómetro y otro a partir del quinto kilómetro. Al igual que en el ensayo anterior es a partir del cuarto kilómetro

cuando se produce un descenso brusco en estas diferencias (Figura 188). Las diferencias medias son ligeramente inferiores a las del ensayo con sólo Vigo como fuente de desplazamientos, pero los coeficientes de variación son similares, aunque un poco mayores (Tabla 49).

Tabla 49. Variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo 0-300 segundos del cálculo de las cabeceras comarcales en el ámbito de estudio.

Distancia (Km)	Dif. media (seg)	Desv. Típica (seg)	Coef. Variación
1	59,5	59,6	100,1%
2	59,1	61,5	104,0%
3	64,5	64,6	100,3%
4	59,1	59,0	99,7%
5	35,3	37,2	105,3%
6	31,5	30,1	95,4%
7	32,0	29,1	90,9%
8	34,3	27,2	79,3%
9	34,4	24,7	71,7%
10	30,8	18,7	60,7%

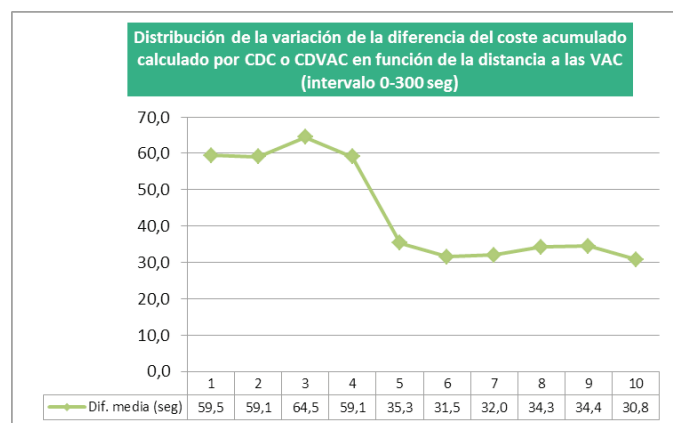


Figura 188. Gráfico de la distribución de la variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo 0-300 segundos del cálculo de las cabeceras comarcales en el ámbito de estudio.

Si atendemos al porcentaje que supone esa diferencia con respecto al valor calculado con el método de Coste Distancia considerando las VAC, vemos como

desciende a medida que nos separamos de las VAC. Las variaciones del coste acumulado calculado con el método CDC en el primer kilómetro limitante con el trazado de las VAC representan casi un 13% con respecto al coste acumulado calculado por CDVAC. Y en el segundo y tercer kilómetro, con un porcentaje del 9% y del 7,6% respectivamente, también se supera al porcentaje global del 7,2% obtenido en todo el ámbito de análisis (Tabla 50). Este porcentaje va descendiendo a medida que nos vamos separando de las VAC, apreciándose un cambio de tendencia en el descenso a partir del quinto kilómetro (Figura 189).

Tabla 50. Porcentaje de la diferencia de costes acumulado entre los métodos CDC y CDVAC, con respecto al valor del coste acumulado para CDVAC, en función de la distancia al trazado de las VAC, para el intervalo 0-300 segundos del cálculo de las cabeceras comarcales en el ámbito de estudio.

Distancia (Km)	% Dif. media (seg)	Desv. Típica (seg)	Coef. Variación
1	12,8	18,4	143,4%
2	9,0	10,8	120,5%
3	7,6	7,8	102,8%
4	6,7	6,8	102,1%
5	3,9	4,7	121,5%
6	3,1	3,5	112,3%
7	2,8	2,9	102,2%
8	2,9	2,5	87,9%
9	2,7	2,1	78,1%
10	2,4	1,8	75,3%

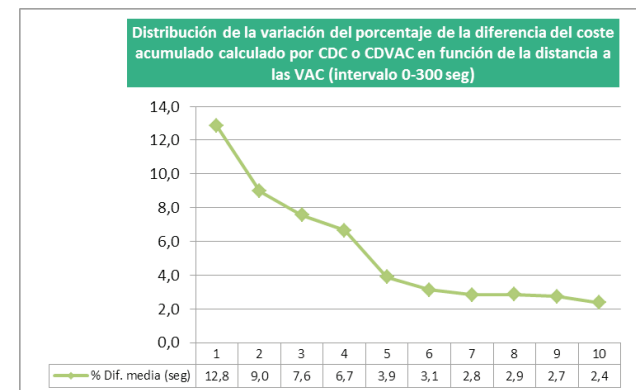


Figura 189. Gráfico de la distribución de la variación del porcentaje de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo 0-300 segundos del cálculo de las cabeceras comarcales en el ámbito de estudio.

Al analizar como varían con la distancia a las VAC todos los valores de la diferencia entre los costes acumulados por el método CDC y el CDVAC, observamos divergencias con respecto a los valores del intervalo entre 0 y 300 segundos. Los valores descienden de forma mucho más acusada, tanto en la diferencia absoluta, como en su porcentaje (Tabla 51 y Tabla 52). El cambio de tendencia que se produce a partir del quinto kilómetro, es más acusado en esta ocasión, suavizando ese descenso para distancias superiores (Figura 190 y Figura 191).

Tabla 51. Variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el cálculo de las cabeceras comarcales en todo el ámbito de estudio.

Distancia (Km)	Dif. media (seg)	Desv. Típica (seg)	Coef. Variación
1	48,7	80,4	165,0%
2	41,0	62,6	152,7%
3	33,4	60,8	181,9%
4	21,7	52,5	241,5%
5	8,2	33,3	405,3%
6	6,1	28,9	474,9%
7	5,9	29,6	497,6%
8	4,7	30,0	640,7%
9	-0,7	27,9	-4174,1%
10	-7,5	22,0	-292,9%

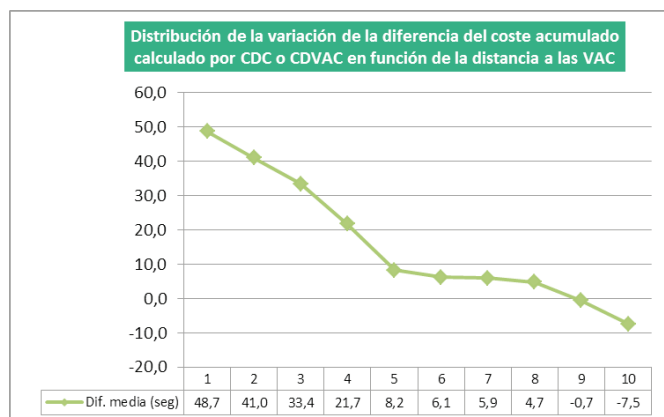


Figura 190. Gráfico de la distribución de la variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el cálculo de las cabeceras comarcales en todo el ámbito de estudio.

Tabla 52. Porcentaje de la diferencia de costes acumulado entre los métodos CDC y CDVAC, con respecto al valor del coste acumulado para CDVAC, en función de la distancia al trazado de las VAC, para el cálculo de las cabeceras comarcales en todo el ámbito de estudio.

Distancia (Km)	% Dif. media (seg)	Desv. Típica (seg)	Coef. Variación
1	9,3	17,0	181,5%
2	5,7	10,1	177,2%
3	3,5	7,4	211,0%
4	2,0	6,3	318,5%
5	0,5	4,2	926,0%
6	0,1	3,4	2357,6%
7	0,1	3,1	3178,5%
8	-0,1	2,9	-5341,9%
9	-0,6	2,6	-466,4%
10	-1,2	2,1	-172,9%

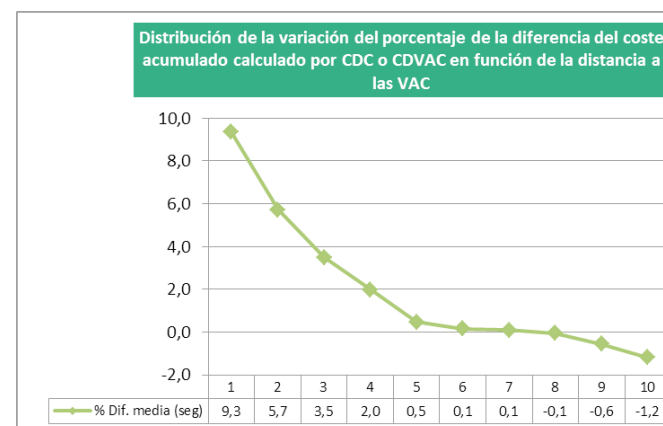


Figura 191. Gráfico de la distribución de la variación del porcentaje de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el cálculo de las cabeceras comarcales en todo el ámbito de estudio.

Al analizar la variación de las diferencias de costes acumulados en cada Zona de Desplazamiento entre operar con CDC y CDVAC, observamos como los cambios son diferentes al considerar varios lugares fuentes, frente a disponer de una sola fuente de desplazamientos. En esta ocasión, prácticamente todas las zonas presentan valores medios similares, pues no siempre los trazados



de las VAC serán los más idóneos para acceder a las cabeceras comarcales. Por ello se muestran variaciones de costes acumulados parecidas en todas las Zonas de Desplazamiento (Tabla 53). Las carreteras convencionales son las que ofrecen mayor diferencia media (18,9 seg), y los enlaces las que tienen menos cambio (10,7 seg). En todas las zonas se muestra como el método CDC ofrece costes acumulados mayores que en CDVAC.

Tabla 53. Variación media de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la Zona de Desplazamiento para el análisis de las cabeceras comarcales.

ZD	CONTEO	MEDIA	STD
1 - Terreno	61.008	16,3	64,6
2 - Carretera	89.787	18,9	48,9
3 - VAC	867	17,6	24,8
4 - Enlace	4.140	10,7	22,3
TOTALES	155.802	17,7	55,1

Si analizamos como se distribuyen los valores de diferencias de costes acumulados entre emplear el método CDC o el CDVAC (Figura 192), vemos como la distribución se asemeja al resultado obtenido para el acceso a Vigo, si bien ahora las distancias se acortan, y la mayoría de las variaciones importantes ocurren a menos de 5.000 metros de un enlace de VAC. Las variaciones medias en segundos y en porcentajes también disminuyen, como puede apreciarse en las siguientes gráficas, sin embargo las gráficas tienen una forma similar a las obtenidas en el cálculo de la accesibilidad a Vigo.

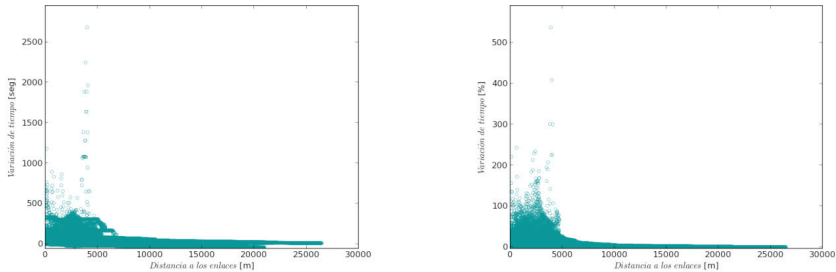


Figura 192. Variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre

los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CD, para análisis de cabeceras de comarca.

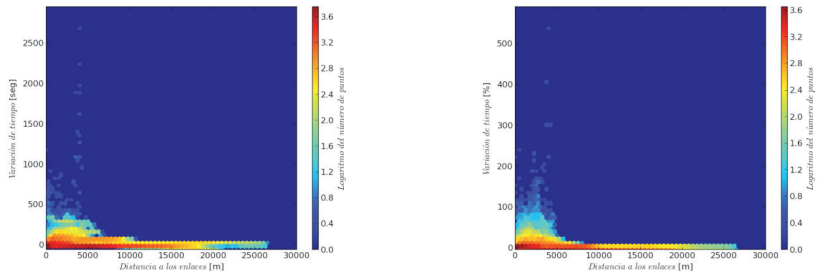


Figura 193. Distribución del número de puntos en función de la variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CD, para análisis de cabeceras de comarca.

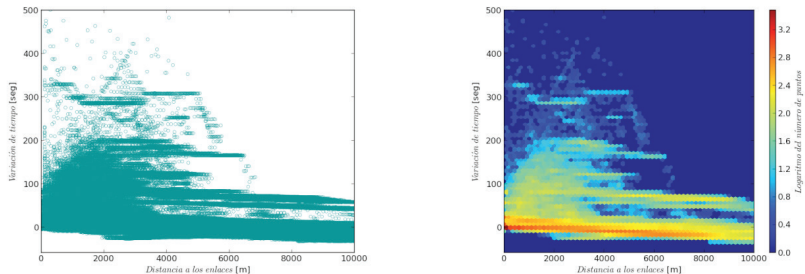


Figura 194. Distribución del número de puntos hasta una distancia de 10 km a un enlace VAC, en función de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC (figura de la izquierda) y cuantificación de los mismos (figura de la derecha), para análisis de cabeceras de comarca.

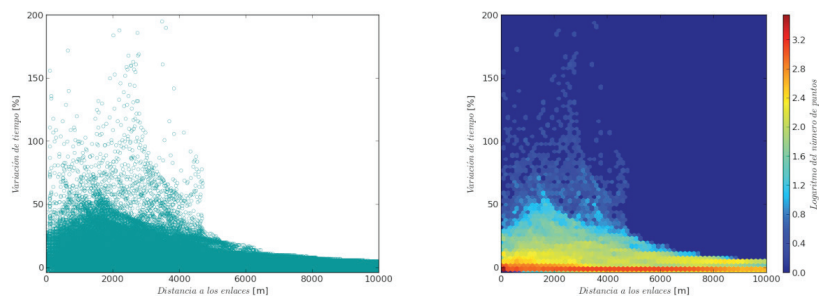


Figura 195. Distribución del número de puntos hasta una distancia de 10 km a un enlace VAC, en función del porcentaje de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC (figura de la izquierda) y cuantificación de los mismos (figura de la derecha), para análisis de cabeceras de comarca.

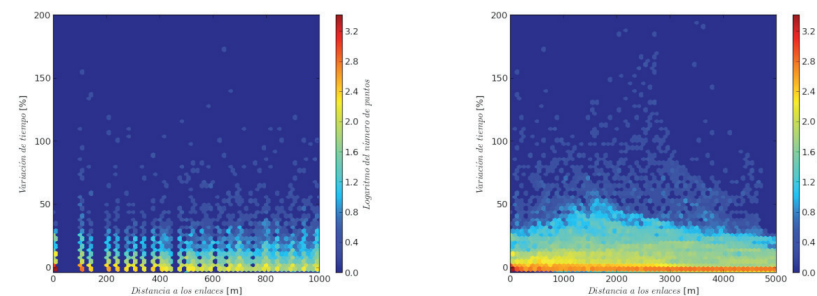


Figura 197. Distribución del número de puntos en función del porcentaje de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CD, para análisis de cabeceras de comarca. La figura de la izquierda muestra estos valores hasta una distancia de 1 km a un enlace VAC. La figura de la derecha los muestra hasta una distancia de 5 km a un enlace VAC.

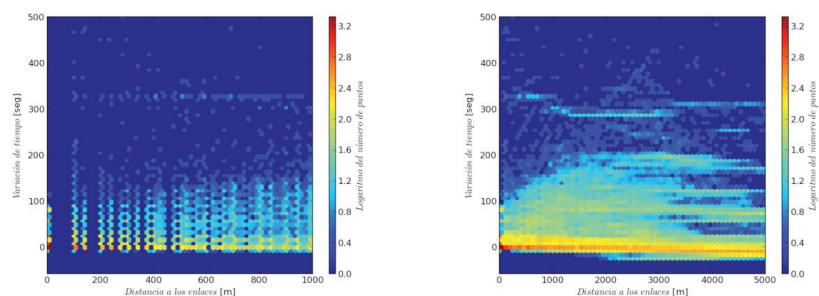


Figura 196. Distribución del número de puntos en función de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CD, para análisis de cabeceras de comarca. La figura de la izquierda muestra estos valores hasta una distancia de 1 km a un enlace VAC. La figura de la derecha los muestra hasta una distancia de 5 km a un enlace VAC.

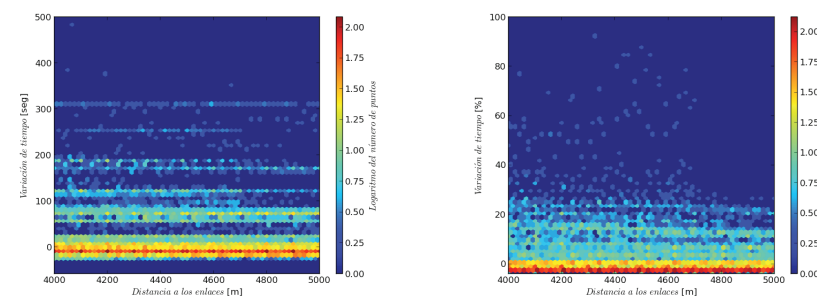


Figura 198. Detalle entre la distancia 4.000 y 5.000 m, de la distribución del número de puntos en función de la variación en tiempo y porcentaje entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para análisis de cabeceras de comarca.



6.1.6. Conclusiones de la comparación de métodos

La comparación entre los diferentes métodos de cálculo de accesibilidad empleados en este estudio, ha puesto de manifiesto que es completamente inadecuado no considerar las Vías de Alta Capacidad (VAC) al utilizar el método de Coste Distancia. En el ensayo realizado para estudiar la accesibilidad a la ciudad de Vigo, se comprueba que no tener en cuenta las VAC aumenta los costes de desplazamiento en aproximadamente el 30%, aunque las variaciones en valor absoluto alcanzan el 93,5%. Además prácticamente el 100% de las celdas varían significativamente de valor.

Emplear métodos que corrijan el acceso libre a las VAC que permite el modelo de Coste Distancia, ofrece unos costes acumulados más elevados para los desplazamientos, como era de esperar. Sin embargo, las diferencias globales obtenidas entre el método de Suma de Costes Parciales (SCP), el método de Coste Distancia Condicionado (CDC) y el método de Coste Distancia considerando las VAC (CDVAC) en la superficie de costes, no son muy altas para un análisis global de los resultados de todo el ámbito de estudio. Aunque en las zonas cercanas a los trazados de las VAC, sí que se aprecian diferencias a tener en cuenta.

La aplicación del método de SCP ofrece un coste acumulado entre un 9% y un 16% mayor que el método de CDVAC, especialmente en la franja de menos de media hora, para los ensayos realizados. Sin embargo, la aplicación del algoritmo SCP muestra debilidades en función de la situación de los lugares fuente de desplazamientos y de las zonas de influencia calculadas para los enlaces de las VAC. Este problema obliga a reconsiderar los procesos de cálculo de este método, para evitar distorsiones en los cálculos.

Por su parte el método CDC ofrece mayor consistencia en los resultados. El coste acumulado global obtenido en los ensayos frente al método CDVAC, aumenta entre un 0,2% y un 2% al calcular la accesibilidad a la ciudad de Vigo y a las cabeceras comarcales del ámbito de estudio establecido, respectivamente. Se comprueba que al incrementar el número de lugares fuente de desplazamientos, las variaciones entre los métodos aumentan. Casi un 50% (entre el 45 y el 48% en estos ensayos) de la superficie considerada varía de valor al

calcularlo con CDC, fundamentalmente en la franja de coste acumulado hasta los cinco minutos. Las zonas cercanas a las VAC evidentemente, son las que ofrecen mayores variaciones respecto a los resultados obtenidos con CDVAC. Aunque en general la variación media en los ensayos entre los cálculos obtenidos por CDC o por CDVAC, en las celdas que cambian de valor, se sitúa entre el 4,4% y el 7%, en el primer kilómetro de distancia al trazado de estas infraestructuras, esa diferencia aumenta hasta el 8% y el 13%, en función de considerar uno o más lugares fuente. Esa influencia en la variación del método es relativamente significativa hasta los primeros cuatro o cinco kilómetros de distancia a las VAC, y a partir de ahí, las diferencias son menos importantes.

Estos porcentajes aunque son en sí mismos significativos, están muy condicionados al ámbito de estudio considerado. En estos ensayos se ha contado con una red viaria muy densa, que ofrece múltiples posibilidades de desplazamientos a los usuarios de la misma, lo que origina que las variaciones sean menores a otros lugares. El empleo del método CDC en áreas con menor densidad viaria, posiblemente ofrezca diferencias más importantes con los cálculos obtenidos por CDVAC. En cualquier caso, se demuestra el correcto funcionamiento del método planteado y sus potenciales usos.

6.2. Análisis de precisión del método de Coste Distancia Condicionado

Para contrastar el funcionamiento del método de Coste Distancia Condicionado, se propone realizar los cálculos del ensayo anterior con unos datos de entrada de mayor resolución, y por tanto más cercanos a la realidad. Consideramos un nuevo ensayo para calcular la accesibilidad a la ciudad de Vigo en el mismo ámbito geográfico, pero para datos de entrada con un tamaño de celda cuatro veces inferior al usado anteriormente. Es decir, emplearemos ahora una resolución de 25 metros, y analizaremos los resultados alcanzados, comparándolos con los obtenidos antes. De esta forma, el valor que antes estaba recogido en una celda de tamaño 100 metros, ahora estará diferenciado en 16 celdas de tamaño 25 m.

Con la finalidad de conocer el grado de precisión de los resultados obtenidos con los métodos de cálculo de accesibilidad mediante modelos ráster, se ha analizado también el coste en tiempo en una zona del ámbito mediante procedimientos basados en el análisis de redes del modelo vectorial.

En este apartado recogeremos los resultados de ambos análisis.

6.2.1. Datos de entrada para los cálculos de accesibilidad

Para este ensayo, todas las capas empleadas en este ensayo van a ser las mismas usadas en el apartado anterior, aunque en esta ocasión van a tener una resolución de 25 metros. Este tamaño de la celda del ráster evita sobreestimar la superficie viaria, ajustándose más a la realidad, aunque supondrá un aumento considerable en los tiempos de cálculo de los métodos a emplear, especialmente en el caso del Coste Distancia Condicionado, que en algún caso ha superado las 65 horas de procesamiento de las operaciones necesarias con los datos de entrada.

Se tomará únicamente la ciudad de Vigo como lugar fuente de desplazamientos, pues las diferencias observadas con considerar más lugares fuente, aunque aumenten las variaciones entre los resultados de los métodos, no parece que éstas sean muy significativas para el objetivo que estamos buscando en esta ocasión.

Para la obtención de las pendientes del terreno se vuelve a utilizar el Modelo Digital del Terreno de Galicia elaborado por el SITGA a partir de la topografía de la cartografía básica de Galicia a escala 1/5000, obteniendo una malla con un punto de cota cada 50 metros. Al pasar la resolución a 25 metros, cada origen la subdividimos en 4 celdas con el mismo valor. En este caso, no se consigue aumentar la precisión del dato origen, pero evitamos perder precisión como pasaba en los ensayos anteriores, donde la pendiente tenía una resolución de cálculo de 100 metros.

Los trazados de la red viaria siguen siendo los ofrecidos por la empresa NavTeq en 2009, rasterizados en esta ocasión con resolución de 25 metros, por lo

que será esa distancia la que se considere para asignar el coste de tiempo que supone atravesar cada celda en función de la velocidad dada en cada lugar. Este dato se combina junto con los costes asignados según las pendientes máximas, para determinar la Superficie de Costes a emplear en los modelos de accesibilidad de este ensayo. Los costes asignados a cada celda se corresponden a los tiempos que supone atravesarla con las mismas velocidades asignadas que en los ensayos anteriores.

Las Zonas de Desplazamiento necesarias en el método CDC, se obtendrán de la misma forma que en el ensayo anterior. Aunque al reducir el tamaño de celda, podríamos disminuir el ámbito de los enlaces, lo hemos mantenido con un radio de 500 metros para este ensayo. Lo que sí varían son las zonas de cruce entre las carreteras convencionales y las vías de alta capacidad, con lo que vuelven a obtenerse con el mismo procedimiento empleado anteriormente.

El resultado final ofrece una configuración más ajustada a la estructura viaria real, pues el tamaño de celda es mucho más adecuado que en el caso anterior (Figura 199). La superficie ocupada en esta ocasión por las carreteras convencionales no llega al 20% (Tabla 54) frente a casi el 60% que suponía al considerar una resolución de 100 metros (Tabla 27). La variación de porcentaje se compensa por el aumento de la superficie clasificada como Terreno, que en esta ocasión supera el 75%.

Tabla 54. Distribución del número de celdas por Zona de Desplazamiento en el ámbito geográfico de análisis para una resolución de celda de 25 metros.

ZD	CONTEO	% CONTEO
1 - Terreno	1.922.875	77,47%
2 - Carretera	488.743	19,69%
3 - VAC	3.318	0,13%
4 - Enlace	67.066	2,70%
TOTALES	2.482.002	100%

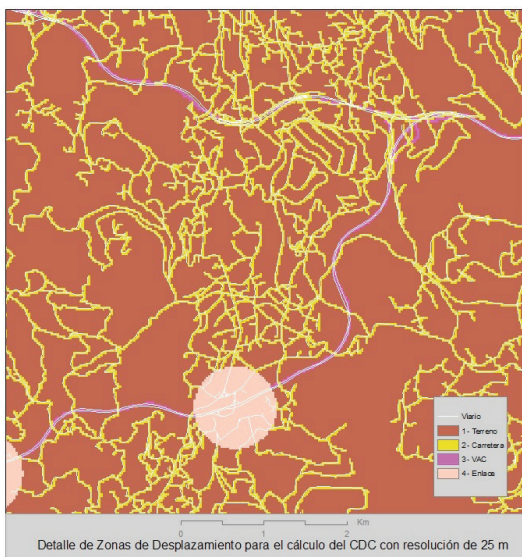


Figura 199. Detalle de la configuración de las Zonas de Desplazamiento definitivas para el cálculo del algoritmo CDC con un tamaño de celda de 25 metros.

6.2.2. Comparación entre CDC y CDVAC para el cálculo de la accesibilidad a la ciudad de Vigo

Para este ensayo con datos de entrada con mayor resolución, se considera nuevamente el cálculo de accesibilidad a la ciudad de Vigo. En esta ocasión únicamente van a realizarse las operaciones con los métodos de Coste Distancia considerando las VAC y de Coste Distancia Condicionado, pues son los que anteriormente han mostrado mayor grado de similitud y consistencia.

6.2.2.1. Método de Coste Distancia considerando las VAC aplicado en la accesibilidad de Vigo con resolución de 25 metros

Al emplear el método de Coste Distancia considerando en la Superficie de Costes la participación de las VAC, se podrá enlazar en cualquier punto del trazado de estas infraestructuras para el cálculo de los costes de desplazamientos. No

se consideran por tanto, las limitaciones de acceso que este viario establece para una adecuada circulación.

Los resultados obtenidos en este ensayo demuestran que disponer de una menor resolución en los datos de entrada de los cálculos supone un aumento en el valor de los costes acumulados. En este caso, usar una resolución de 25 metros en lugar de 100 metros, hace que el coste acumulado medio se incremente un 15,8%, pasando de los 1.677,5 segundos a los 1.943,2 segundos. Y el valor máximo obtenido aumenta un 30,4% hasta los 11.364 segundos, frente a los 8.714 segundos obtenidos en el ensayo anterior con resolución de 100 metros (Tabla 55).

Tabla 55. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Coste Distancia considerando las VAC para el ámbito geográfico de análisis, y con una resolución de 25 metros.

CDVAC_25	CONTEO	% CONTEO	MIN	MAX	RANGO	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA
< 5 min	25.496	1,03%	0	300	300	211,4	64,7	225	5.389.270	0,11%
5 - 10 min	95.803	3,86%	301	600	299	470,0	82,4	476	45.031.200	0,93%
10 - 15 min	162.762	6,56%	601	900	299	757,3	85,8	759	123.252.000	2,56%
15 - 30 min	930.214	37,50%	901	1.800	899	1.378,9	249,8	1.387	1.282.640.000	26,61%
30 - 45 min	787.927	31,76%	1.801	2.700	899	2.213,1	260,2	2.193	1.743.740.000	36,17%
45 min - 1h	363.840	14,67%	2.701	3.600	899	3.042,2	241,5	2.997	1.106.860.000	22,96%
1h - 1h 15min	71.342	2,88%	3.601	4.500	899	3.949,2	254,1	3.901	281.746.000	5,84%
1h15min - 1h30min	28.170	1,14%	4.501	5.400	899	4.889,3	250,8	4.866	137.731.000	2,86%
1h30min - 1h45min	9.680	0,39%	5.401	6.300	899	5.765,8	258,2	5.717	55.813.200	1,16%
1h45min - 2h	4.011	0,16%	6.301	7.200	899	6.651,9	245,7	6.611	26.680.900	0,55%
> 2h	1.482	0,06%	7.201	11.364	4.163	7.901,8	697,5	7.666	11.710.500	0,24%
TOTALES	2.480.727	100%	0	11.364	11.364	1.943,2	955,2	1.824	4.820.594.070	100%

Visualmente en el mapa de los resultados del coste acumulado con resolución de 25 metros, se aprecia como disminuyen las áreas con menor valor cercanas al lugar fuente de desplazamientos, mientras que aumenta la superficie de las zonas más lejanas (Figura 200). El ámbito cercano a las infraestructuras viarias se reduce, ajustándose a sus trazados de forma muy significativa (Figura 201).

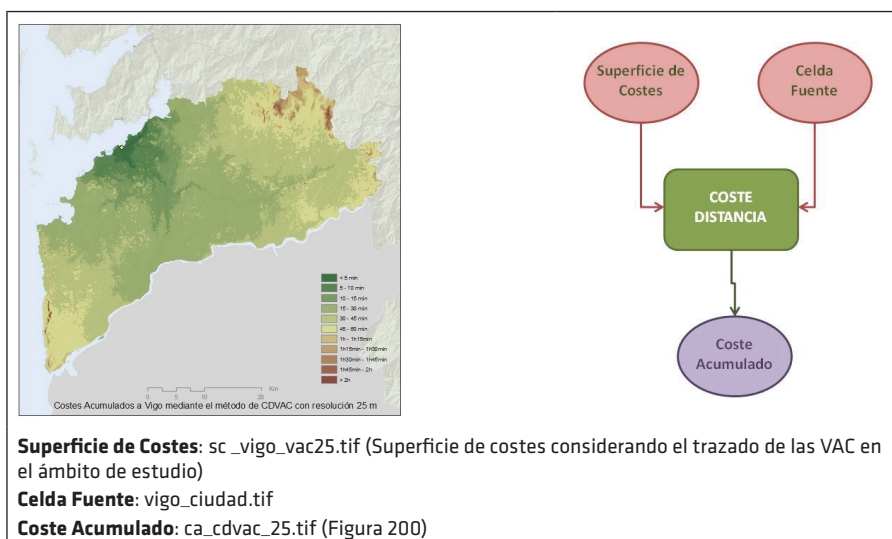


Figura 200. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Coste Distancia considerando el Viario de Alta Capacidad, con resolución de 25 metros.

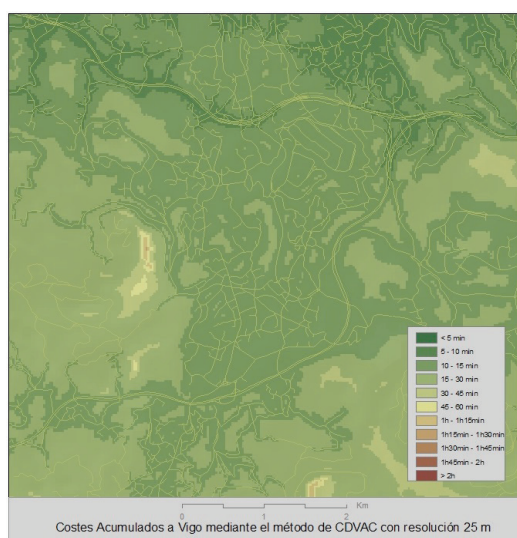


Figura 201. Detalle del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia considerando las VAC, con una resolución de 25 metros. Se incluye el viario vectorial para ayudar a interpretar los resultados.

Las variaciones de superficie aumentan de forma importante con respecto al método CDVAC con resolución 100 (CDVAC100), llegando a una diferencia cercana al 800% entre ambos resultados en el rango anterior a las dos horas (Tabla 56). Hasta la media hora, las diferencias ofrecen un área menor para los resultados con resolución de 25 metros, pero a partir de ahí la superficie aumenta muy significativamente para todos los rangos considerados. Esto supone que la distribución del coste acumulado sufra un descenso en el porcentaje de superficie cubierta hasta los 30 minutos, pasando de casi el 60% con resolución de 100 metros al 48,9% para resolución de 25 metros, aunque se mantienen los rangos donde se producen los picos máximos para la superficie y la suma de costes acumulados en ambos ensayos (Figura 202).

Tabla 56. Variación porcentual de superficie en cada uno de los rangos de tiempo, entre usar el método de Coste Distancia considerando las VAC, con resolución de 100 metros o con resolución de 25 metros.

CDVAC25-CDVAC100	% Variación superficie
< 5 min	-46,1%
5 - 10 min	-31,7%
10 - 15 min	-27,2%
15 - 30 min	-13,3%
30 - 45 min	1,8%
45 min - 1h	100,6%
1h - 1h15min	82,4%
1h15min - 1h30min	171,7%
1h30min - 1h45min	186,7%
1h45min - 2h	795,3%
> 2h	612,5%
TOTALES	0%

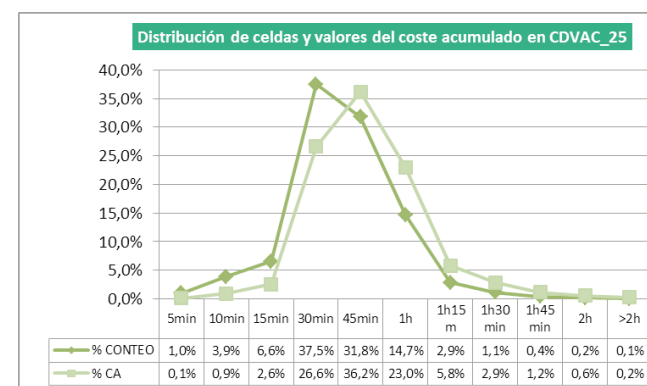


Figura 202. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia considerando las VAC para el ámbito geográfico de análisis, y con resolución de 25 metros.

6.2.2.2. Método de Coste Distancia Condicionado aplicado en la accesibilidad de Vigo con resolución de 25 metros

El procedimiento de cálculo denominado método de Coste Distancia Condicionado (CDC) que se propone en esta investigación, trata de atender los condicionantes que se plantean en los desplazamientos territoriales, incluyendo las especificidades que suponen las VAC en su conexión con el resto de la estructura viaria.

Los resultados alcanzados con este método vuelven a ser visualmente muy similares a los obtenidos con el método de Coste Distancia considerando las VAC (CDVAC), pese a aumentar la resolución de las celdas a 25 metros (CDC_25). El ancho de las franjas entorno a las vías de alta capacidad se reduce (Figura 203 y Figura 204), al restringir el acceso a la mismas a únicamente los enlaces identificados.

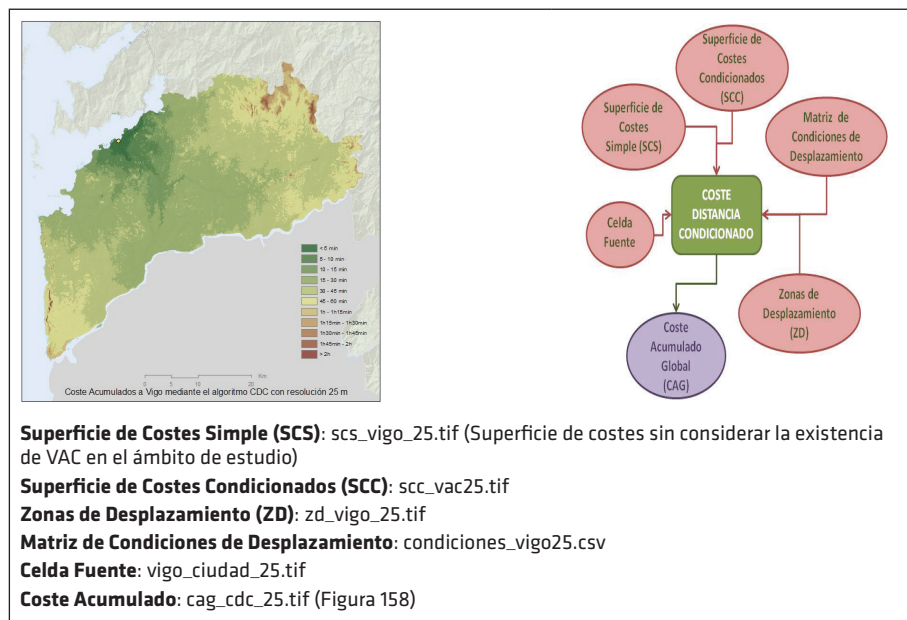


Figura 203. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Coste Distancia Condicionado en el ámbito de estudio con resolución de 25 metros.



Figura 204. Detalle del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia Condicionado con resolución de 25 metros.

El valor medio es 2,1% mayor en CDC que en CDVAC, llegando a 1.984,6 segundos, con una desviación típica similar, de 954,6 segundos, y un coeficiente de variación es ligeramente inferior, del 48,1%. Este aumento casi duplica al obtenido con una resolución de 100 m, pues en ese ensayo el valor medio de CDC era un 1,1% mayor que el obtenido en CDVAC.

El valor máximo es prácticamente coincidente entre CDC y CDVAC para resolución 25 m. Aunque en CDC es un 0,04% mayor, pues llega a 11.369 segundos. Este valor máximo aumenta un 30,6% con respecto al obtenido por este método con una resolución de 100 metros. Y el valor medio se incrementa ahora en un 17% con respecto al calculado para CDC_100 (Tabla 57). La distribución

del coste acumulado muestra una gráfica (Figura 205) muy similar a la obtenida para CDVAC_25, aunque el porcentaje de superficie con tiempos menores a 30 minutos disminuye dos puntos hasta el 46,9%.

Tabla 57. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis con resolución de 25 metros.

CDC_25	CONTEO	% CONTEO	MIN	MAX	RANGO	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA
< 5 min	24.991	1,01%	11	300	289	211,1	64,8	225	5.274.780	0,11%
5 - 10 min	81.749	3,30%	301	600	299	474,8	82,5	485	38.815.400	0,79%
10 - 15 min	154.567	6,23%	601	900	299	762,3	85,1	768	117.834.000	2,39%
15 - 30 min	903.078	36,40%	901	1.800	899	1.383,8	244,2	1.391	1.249.660.000	25,38%
30 - 45 min	806.760	32,52%	1.801	2.700	899	2.220,0	260,1	2.199	1.791.010.000	36,38%
45 min - 1h	388.562	15,66%	2.701	3.600	899	3.040,8	240,6	2.995	1.181.550.000	24,00%
1h - 1h 15min	76.852	3,10%	3.601	4.500	899	3.942,3	253,2	3.891	302.973.000	6,15%
1h15min - 1h30min	28.709	1,16%	4.501	5.400	899	4.890,1	251,4	4.867	140.390.000	2,85%
1h30min - 1h45min	9.835	0,40%	5.401	6.300	899	5.769,1	258,5	5.720	56.738.600	1,15%
1h45min - 2h	4.075	0,16%	6.301	7.199	898	6.654,9	247,0	6.615	27.118.800	0,55%
> 2h	1.508	0,06%	7.201	11.369	4.168	7.899,1	695,1	7.660	11.911.800	0,24%
TOTALES	2.480.686	100%	11	11.369	11.358	1.984,6	954,6	1.872	4.923.276.380	100%

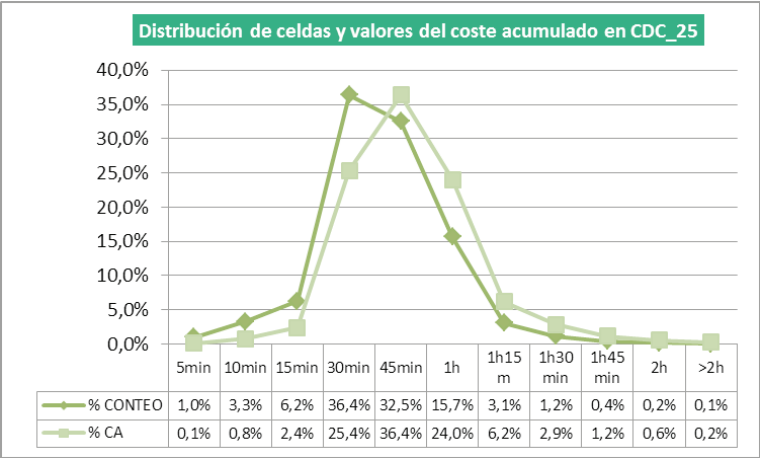


Figura 205. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis.

Al analizar la variación de superficie en los diferentes rangos de tiempo establecidos, se comprueba como hay una variación media del 4,4% del tamaño de cada rango en función de usar el método CDVAC_25 o CDC_25. Destacan las franjas de menor tiempo inferiores a 30 minutos, pues en ellas el méto-

do CDVAC consigue superficies más amplias que el método CDC, debido a la posibilidad de acceder a las VAC en cualquier punto. Cobra especial fuerza el intervalo entre 5 y 10 minutos, con una variación cercana al 15%, que casi es el doble de la obtenida con resolución de 100 metros (Tabla 58). En los intervalos de más de media hora, la superficie es mayor para el método CDC_25, que la obtenida por CDVAC_25.

Tabla 58. Variación porcentual de superficie y costes acumulados en cada uno de los rangos de tiempo, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Coste Distancia Condicionado, para una resolución de 25 metros.

CDVAC25-CDC25	% Variación superficie	% Variación suma
< 5 min	2,0%	2,1%
5 - 10 min	14,7%	13,8%
10 - 15 min	5,0%	4,4%
15 - 30 min	2,9%	2,6%
30 - 45 min	-2,4%	-2,7%
45 min - 1h	-6,8%	-6,7%
1h - 1h 15min	-7,7%	-7,5%
1h15min - 1h30min	-1,9%	-1,9%
1h30min - 1h45min	-1,6%	-1,7%
1h45min - 2h	-1,6%	-1,6%
> 2h	-1,8%	-1,7%
TOTALES	0%	-2,1%

La superficie total que varía de rango de tiempos acumulados entre usar el método de Coste Distancia considerando las VAC (CDVAC) o emplear el Coste Distancia Condicionado (CDC), vuelve a representar el 5% del ámbito de análisis (Figura 206), similar a lo que suponían este cambio de métodos con la resolución de 100 metros. En este caso se detectan variaciones que suponen un salto de hasta 5 intervalos en espacios muy concretos.

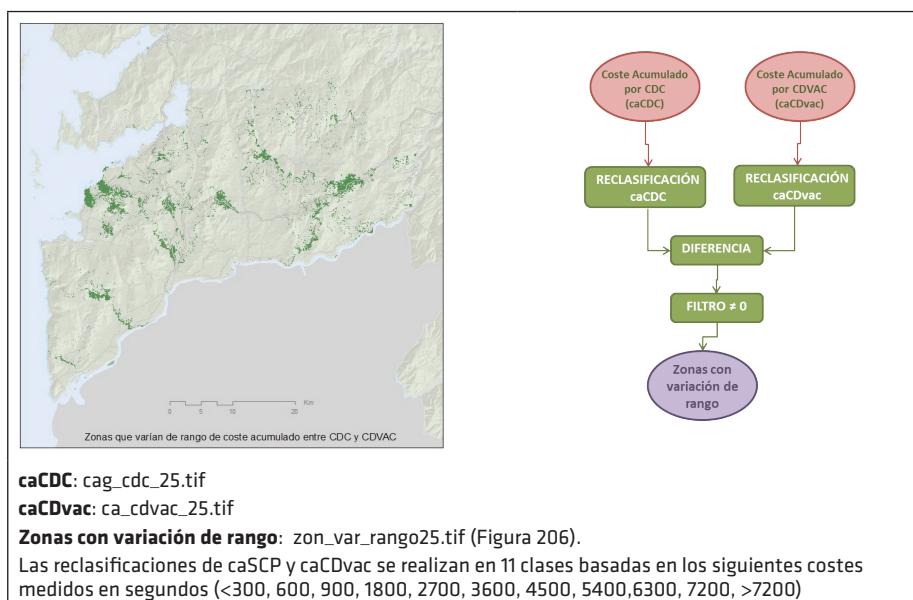


Figura 206. Zonas con variación del rango de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicional y el método de Coste Distancia considerando las VAC, para este ámbito de estudio.

Al aumentar la resolución, las zonas con coste acumulado en CDC menor al obtenido con CDVAC, se reducen a simples anécdotas, pues apenas representan un 0,06% de la superficie total del ámbito. El 55% de la superficie que con una resolución de 100 metros, definíamos como sin apenas diferencias (incluyendo las zonas con valor CDC menor y las zonas sin variación del coste acumulado entre ambos métodos), pasa ahora a representar un 30,3% del ámbito de análisis (Figura 207). Aunque la variación media global en valor absoluto, nos ofrece un valor de 41,4 segundos, en el casi 70% de la superficie restante, donde los costes acumulados calculados por CDVAC son menores que con CDC, la variación media alcanza los 59,4 segundos, con una desviación típica de 76,5 segundos. Como podemos comprobar estos valores son muy semejantes a los obtenidos con la resolución de 100 metros. La diferencia máxima alcanza el valor de 4.553 segundos, aunque las celdas con una diferencia de valor superior a los 300 segundos no llegan al 1% (Tabla 59).

Si nos fijamos en el porcentaje de variación del coste acumulado calculado en CDC_25 con respecto al valor de CDVAC_25, se aprecia como en global hay una variación del 2,4%. Cuando la variación es menor a los 5 minutos, el porcentaje se eleva al 3,2%. Y en el intervalo entre 5 y 10 minutos, el porcentaje de variación casi alcanza el 23,3%. Para intervalos mayores, los porcentajes aumentan, aunque el número de celdas en los que se producen esas diferencias son prácticamente insignificantes con respecto al resultado global. El porcentaje de variación máxima obtenido en una celda es del 626%, situándose estos valores altos en borde exteriores de los trazados de VAC.

Tabla 59. Diferencias entre el coste calculado con CDC y con CDVAC en la superficie del ámbito de análisis para una resolución de 25 metros.¹⁴⁶

CDC25-CDVAC25	CONTEO	% SUPERFICIE	VARIACIÓN MEDIA	% VARIACION MEDIA
CDC menor	1.600	0,06%	1	0,0%
Sin cambio	751.105	30,28%	0	0,0%
< 5 min	1.703.711	68,68%	53,8	3,2%
5 - 10 min	22.203	0,90%	401,8	23,3%
10 - 15 min	1.297	0,05%	707,3	56,2%
15 - 30 min	607	0,02%	1222,1	102,6%
30 - 45 min	51	0,00%	2062,5	204,8%
45 min - 1 h	59	0,00%	3224,9	141,9%
> 1 h	53	0,00%	3930,7	186,9%
	2.480.633	100%	41,4 seg	2,4%

¹⁴⁶ Existen mínimas diferencias en cuanto al número de celdas totales con valor no nulo entre los resultados de los diferentes métodos de cálculo empleados, debidos a ajustes en los bordes de ciertos resultados intermedios de los geoprocetos realizados. En cualquier caso, la diferencia es tan pequeña que no se considera preciso rehacer los cálculos con nuevos ajustes en los datos y en las operaciones para evitar esta circunstancia.

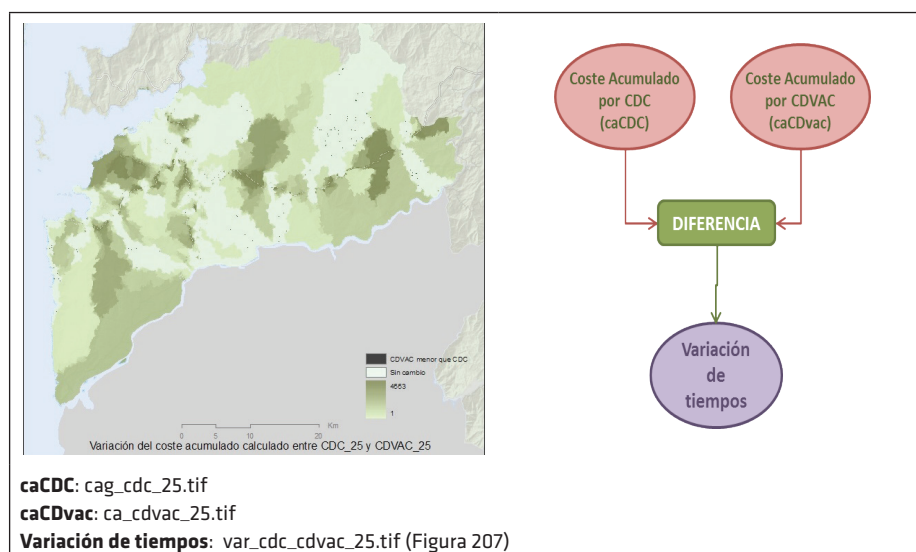


Figura 207. Zonas según la variación de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicionado y el método de Coste Distancia considerando las VAC, con resolución de 25 metros

Si analizamos lo que ocurre en diferencias de un minuto dentro de ese intervalo, se aprecia como los dos primeros minutos representan casi el 90% de la superficie de esa franja. Las diferencias entre los valores calculados por CDC y por CDVAC van aumentando su porcentaje con respecto al valor de CDVAC a medida se aumenta esa variación de costes. Pasamos de 0,8% en el primer minuto al 16,7% en el quinto minuto. Podemos comprobar como más de un 5% de la superficie total del ámbito de estudio tiene una variación media de 148,4 segundos al usar uno u otro método de cálculo, lo que supone diferencias de más del 12% del coste acumulado calculado (Tabla 60).

Tabla 60. Diferencias de costes acumulados entre 0 y 5 minutos, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Coste Distancia Condicionado.

CDC25-CDVAC25	CONTEO	%AREA 0-300	%AREA TOTAL	MEDIA	STD	MEDIANA	SUMA	% CA	% VAR
0-60	1.036.953	60,9%	41,8%	21,8	17,6	14	22.616.700	24,7%	0,8%
60-120	493.555	29,0%	19,9%	81,8	18,4	75	40.352.400	44,0%	4,6%
120-180	134.435	7,9%	5,4%	148,4	15,6	142	19.947.200	21,8%	12,1%
180-240	24.949	1,5%	1,0%	200,4	16,1	194	4.999.360	5,5%	16,2%
240-300	13.819	0,8%	0,6%	268,6	15,8	270	3.711.470	4,1%	16,7%
TOTALES	1.703.711	100%	68,7%	53,8	18,0	51	91.627.130	100%	3,2%

Si para ese intervalo hasta los 5 minutos, estudiamos como varía la diferencia de costes acumulados calculados en ambos métodos en función de la distancia con respecto al trazado de las VAC, observamos una tendencia descendente hasta el quinto kilómetro y luego un aumento de las diferencias hasta el noveno kilómetro donde se produce una caída brusca (Figura 168). La mayor diferencia se presenta en el primer kilómetro con 76,3 segundos, lo que supone un porcentaje de variación respecto al valor de CDVAC_25 de más del 8% (Tabla 62). La distribución de la variación porcentual de la diferencia para este intervalo menor de 5 minutos (Figura 209) vuelve a destacar la tendencia descendente hasta el quinto kilómetro de separación de las VAC, manteniéndose a partir de ahí en un valor constante entorno al 2,1%. A partir del noveno kilómetro este porcentaje desciende con mayor intensidad.

Tabla 61. Variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC_25 y CDVAC_25 en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.

Distancia (Km)	Dif. media (seg)	Desv. Típica (seg)	Coef. Variación
1	76,3	65,4	85,8%
2	64,3	58,1	90,4%
3	61,6	60,4	98,1%
4	59,9	53,0	88,4%
5	50,8	41,3	81,3%
6	49,9	38,4	77,1%
7	51,8	40,1	77,4%
8	53,7	41,3	77,0%
9	55,3	42,6	77,1%
10	45,0	40,3	89,5%

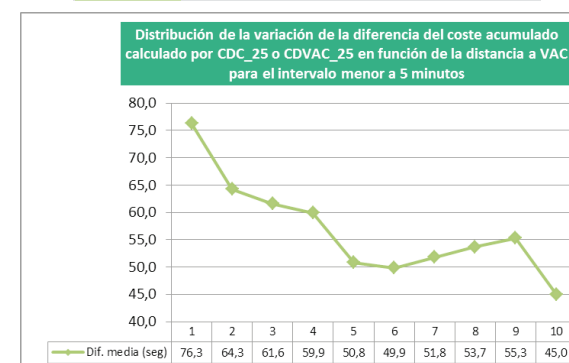


Figura 208. Gráfico de la distribución de la variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC_25 y CDVAC_25 en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.

Tabla 62. Porcentaje de la diferencia de costes acumulado entre los métodos CDC_25 y CDVAC_25, con respecto al valor del coste acumulado para CDVAC_25, en función de la distancia al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.

Distancia (Km)	% Dif. media (seg)	Desv. Típica (seg)	Coef. Variación
1	8,1	8,9	110,3%
2	4,8	5,5	116,4%
3	3,4	4,1	117,6%
4	3,1	3,5	114,6%
5	2,3	2,6	113,4%
6	2,1	2,2	106,9%
7	2,1	2,2	105,6%
8	2,1	2,2	104,9%
9	2,1	2,1	99,9%
10	1,5	1,8	118,5%

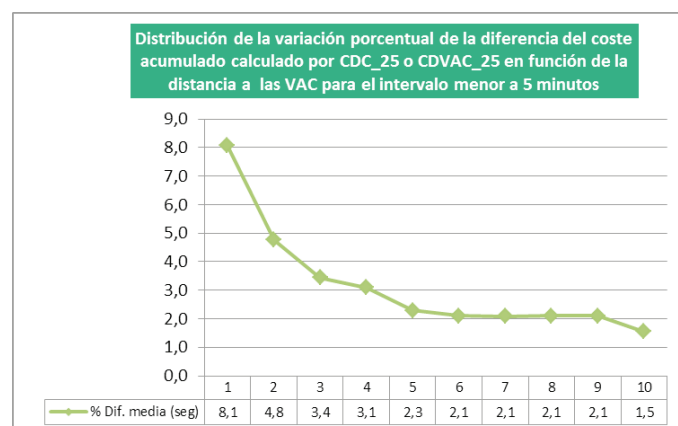


Figura 209. Gráfico de la distribución de la variación de los porcentajes de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC_25 y CDVAC_25, con respecto a los costes acumulados calculados en CDVAC_25, en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.

Comparando estos resultados con los obtenidos en el análisis con resolución de 100 metros (apartado 6.1.4.4), se aprecia como al aumentar la resolución hasta los 25 metros, la variación entre usar CDC o CDVAC parece un poco menos significativa, aunque cuando analicemos las variaciones en cada Zona de Desplazamiento, veremos que realmente eso no es así.

Si extendemos el análisis a todos los intervalos del ámbito geográfico de estudio, los valores evidentemente descienden (Tabla 63 y Tabla 64), pero las tendencias detectadas en la franja menor a cinco minutos, siguen aparecien-

do (Figura 207 y Figura 208).

Tabla 63. Variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC_25 y CDVAC_25 en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para todo el ámbito geográfico de análisis.

Distancia (Km)	Dif. media (seg)	Desv. Típica (seg)	Coef. Variación
1	63,1	121,6	192,7%
2	49,5	74,8	151,1%
3	45,8	66,9	146,0%
4	39,8	51,6	129,6%
5	34,8	41,6	119,4%
6	34,5	39,4	114,1%
7	35,1	40,9	116,6%
8	36,9	42,4	114,9%
9	37,2	43,6	117,1%
10	30,4	39,3	129,3%

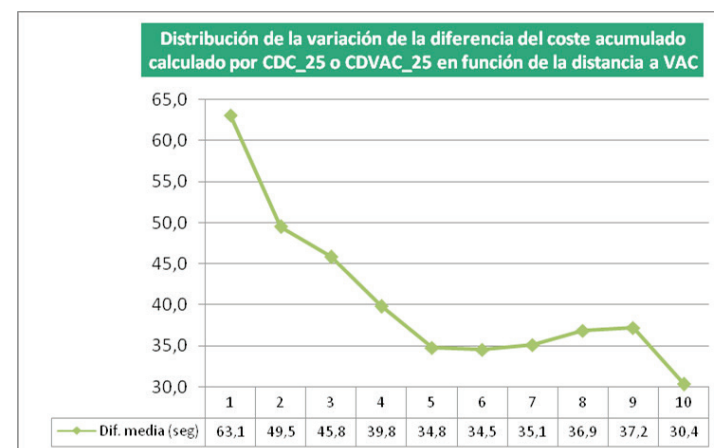


Figura 210. Gráfico de la distribución de la variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC_25 y CDVAC_25 en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para todo el ámbito geográfico de análisis.

Tabla 64. Porcentaje de la diferencia de costes acumulado entre los métodos CDC_25 y CDVAC_25, con respecto al valor del coste acumulado para CDVAC, en función de la distancia al trazado de las VAC, para todo el ámbito geográfico de análisis.

Distancia (Km)	% Dif. media (seg)	Desv. Típica (seg)	Coef. Variación
1	6,0	11,3	188,7%
2	3,4	5,4	157,1%
3	2,5	3,9	157,2%
4	2,1	3,2	157,5%
5	1,6	2,4	153,0%
6	1,5	2,1	145,0%
7	1,4	2,1	145,8%
8	1,4	2,1	143,7%
9	1,4	2,0	140,5%
10	1,0	1,7	160,3%

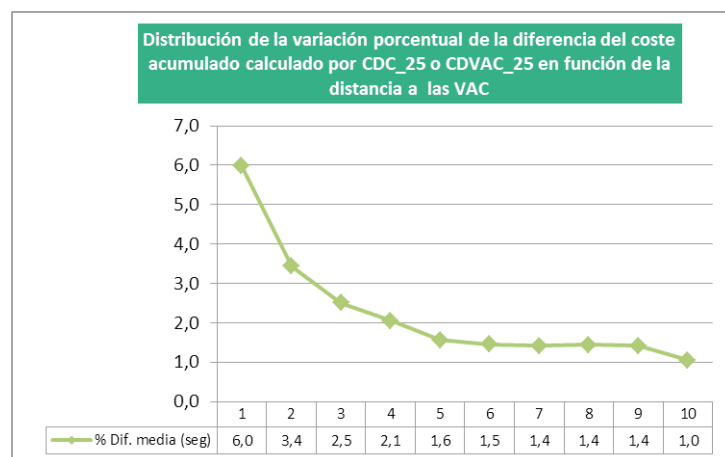


Figura 211. Gráfico de la distribución de la variación porcentual de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC_25 y CDVAC_25 en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para todo el ámbito geográfico de análisis.

Si analizamos cómo varían los cálculos de costes acumulados en cada Zona de Desplazamiento (ZD) entre operar con CDC y CDVAC, observamos como la variación media de los cambios son similares en el Terreno y en las Carreteras Convencionales, mientras que en el trazado de las VAC y en los Enlaces apenas hay variación. Al reducir el tamaño de celda para los cálculos de 100 a 25

metros, vemos como los Enlaces dejan de tener valores más altos en CDVAC, y se comporta igual que el resto de ZD donde el método CDC ofrece costes acumulados mayores. Los coeficientes de variación entre la media y la desviación típica de cada ZD, aunque son altos, se moderan con respecto a los obtenidos para una resolución de 100 metros (Tabla 65).

Los valores máximos en la diferencia entre los costes acumulados calculados en ambos métodos son más altos con una resolución mayor, como es este caso, salvo en el caso de la ZD de las VAC, que sufre un ligero descenso con respecto al máximo obtenido con resolución de 100 metros. De hecho las VAC y las Carreteras apenas muestran variaciones significativas en los máximos obtenidos entre una resolución, comparados con los que se producen en el Terreno y en los Enlaces.

Tabla 65. Variación media de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la Zona de Desplazamiento.

ZD_var_cdc_cdvac_25	CONTEO	MÁXIMO	MEDIA	STD	COEF. VARIACIÓN
1 - Terreno	1.922.702	4.553	42,9	73,1684	170,4%
2 - Carretera	488.641	607	40,7	56,0543	137,8%
3 - VAC	3.317	130	5,0	19,7775	398,6%
4 - Enlace	66.026	1.192	4,1	22,2334	542,9%
TOTALES	2.480.686	4.553	41,4	69,4	167,6%

El porcentaje de variación media en cada ZD con respecto al valor obtenido en CDVAC_25, es de 2,4% para el Terreno, el 2,7% para las Carreteras convencionales, el 1,0% para las VAC y del 0,7% para los Enlaces. Salvo en el caso de los Enlaces, se aprecia como incrementar la resolución a 25 metros, frente a 100 metros, supone que las diferencias entre ambos métodos aumentan de forma relativamente importante.

Los análisis de los valores de los costes acumulados calculado por el método de CDC diferenciados por la Zona de Desplazamiento muestran como la el Terreno y las Carreteras convencionales tienen costes acumulados medios cercanos, al igual que sucede entre las VAC y los Enlaces (Tabla 66).



Tabla 66. Análisis de los valores del coste acumulado calculado (en segundos) por CDC, en función de la Zona de Desplazamiento.

ZD_cdc100	CONTEO	MÁXIMO	MEDIA	STD	COEF. VARIACIÓN
1 - Terreno	61.001	8.703	2.002,2	903,9	45,1%
2 - Carretera	89.785	4.045	1.543,4	665,7	43,1%
3 - VAC	867	1.878	853,1	431,2	50,5%
4 - Enlace	4.138	3.445	658,4	433,1	65,8%
TOTALES	155.791	8.703	1.695,7	814,9	48,1%

Los análisis de la variación de los costes acumulados calculados con el método CDC o con el método CDVAC, con respecto a la distancia a los enlaces VAC, muestran en esta ocasión una distribución diferente a la obtenida en los análisis de accesibilidad con celdas de resolución 100 m. La mayoría de las celdas, casi el 80%, se siguen situando en el entorno de los 10 kilómetros a un enlace VAC (Figura 214). Sin embargo la distribución de estas variaciones en esa franja presenta diferentes picos a distintas distancias, tanto para el análisis de la variación en tiempo, como para el estudio del porcentaje de variación (Figura 212 y Figura 213). En las siguientes gráficas apreciamos con más detalle este comportamiento.

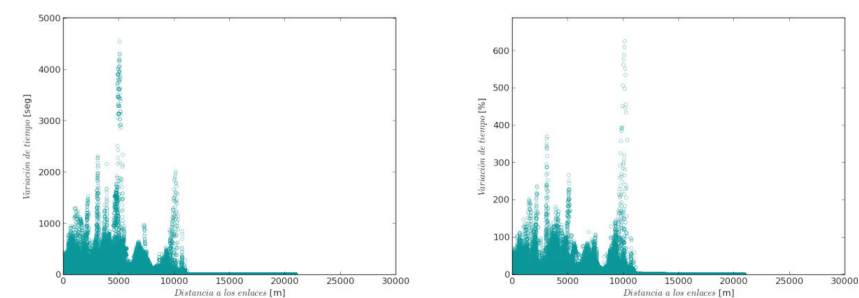


Figura 212. Variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para análisis a Vigo con resolución de 25m.

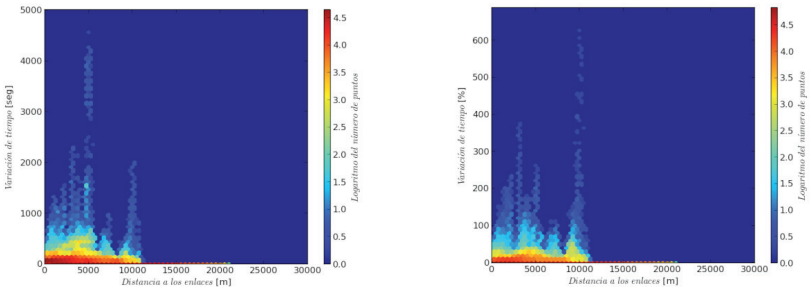


Figura 213. Distribución del número de puntos en función de la variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para el acceso a Vigo con resolución de 25m.

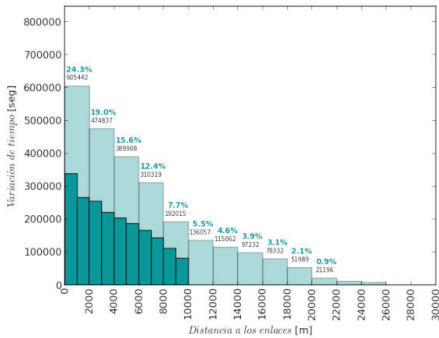


Figura 214. Histograma de la distribución del número de puntos en función de distancia a los enlaces a las VAC para el análisis de accesibilidad con resolución de 25m.

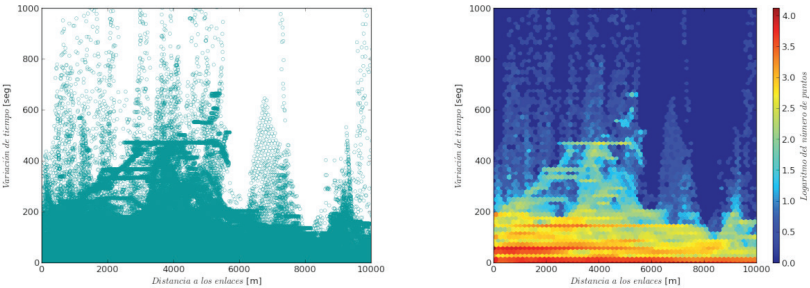


Figura 215. Distribución del número de puntos hasta una distancia de 10 km a un enlace VAC, en función de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC (figura de la izquierda) y cuantificación de los mismos (figura de la derecha), para análisis con resolución 25 m.

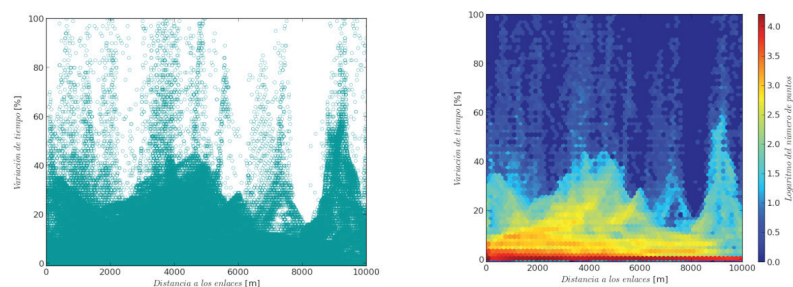


Figura 216. Distribución del número de puntos hasta una distancia de 10 km a un enlace VAC, en función del porcentaje de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC (figura de la izquierda) y cuantificación de los mismos (figura de la derecha), para análisis con resolución 25 m.

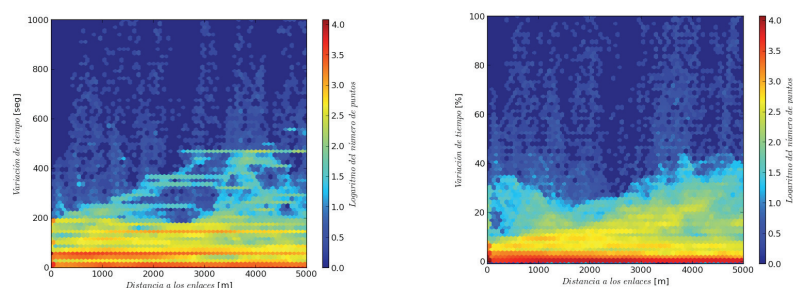


Figura 217. Detalle entre la distancia 0 y 5.000 m, de la distribución del número de puntos en función de la variación en tiempo y porcentaje entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para análisis con resolución de 25m.

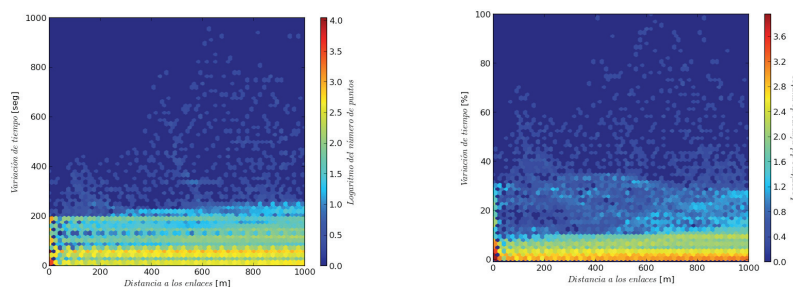


Figura 218. Detalle entre la distancia 0 y 1.000 m, de la distribución del número de puntos en función de la variación en tiempo y porcentaje entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para análisis con resolución de 25m.

6.2.3. Comparación con análisis de redes

Con la finalidad de conocer el grado de precisión de los resultados obtenidos con los procedimientos de cálculo de accesibilidad mediante el modelo ráster, se propone comparar esos cálculos con los obtenidos mediante un análisis vectorial de redes. Aprovechando la posibilidad de manejar los datos viarios de la red de NavTeq de 2009, vamos a estudiar los tiempos de desplazamiento a un lugar fuente y analizar las diferencias con los costes acumulados con los métodos anteriores. Para ello se preparan los segmentos lineales que representan a las carreteras, añadiendo las velocidades a cada uno de ellos con el mismo criterio empleado en los cálculos anteriores (6.1.3.2 Infraestructuras viarias), y calculando el tiempo que supone atravesar cada tramo lineal en función de su longitud.

Se construye la red con la extensión Network Analyst de ArcGis 9.3, sin considerar pendientes, giros, ni sentidos de circulación, para asemejar el modelo a las características implementadas en los métodos ráster. Con ello se calcula el tiempo de recorrido desde 99 puntos aleatorios (Figura 219) del entorno de la ciudad de Vigo a ese lugar, que ya hemos tomado como fuente en ensayos anteriores.

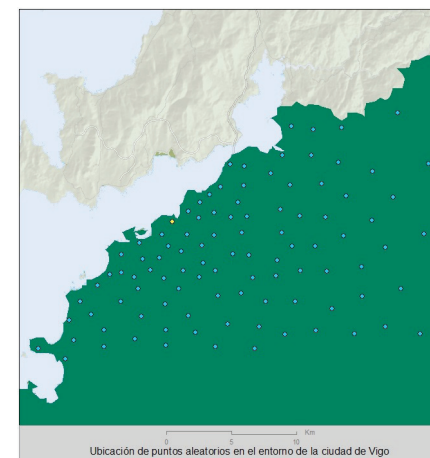


Figura 219. Ubicación de puntos aleatorios en el entorno de la ciudad de Vigo

A partir de los resultados del coste acumulado obtenidos con los métodos ráster de cálculo de accesibilidad empleados en los apartados anteriores (CDVAC, CDC o SCP) puede obtenerse también los caminos óptimos o de mínimo coste desde esos puntos de control (tomados aleatoriamente) hasta llegar al lugar tomado como fuente en los cálculos de desplazamientos (Figura 220). Una vez que disponemos de esos trazados podemos compararlos con los obtenidos por análisis de redes, tanto en un análisis basado en datos ráster (superficies, etc.) como a través de la información conseguida por los datos en formato vectorial (longitudes, etc.).



Figura 220. Esquema del procedimiento de cálculo para obtener rutas mínimas a partir de los costes acumulados calculados previamente

La comparación entre los caminos óptimos obtenidos por análisis de redes vectoriales y los calculados mediante los resultados del método CDVAC aplicado con una resolución de 25 metros (CDVAC_25), nos refleja como este método prima el uso de las VAC al poder acceder a ellas en cualquier lugar (Figura 221). Consigue en general caminos de menor longitud, en parte debido a la metodología de generación de recorridos en el modelo ráster, que potencia el trazado de geometrías lineales (Figura 222). Se comprueba que aproximadamente el

30-40% de su trazado es coincidente con el obtenido por el procedimiento de análisis vectorial (Tabla 67). En global, para todos los puntos considerados, los caminos obtenidos desde los resultados del método CDVAC, reducen la longitud en un 24,4% frente a los calculados por el análisis de redes vectoriales.

Tabla 67. Longitud y superficie de los caminos óptimos obtenidos por análisis de redes y por los resultados calculados mediante CDVAC con resolución de 25 metros.

Caminos óptimos	Superficie (Km2)	Km
Análisis de redes	10,2	396,8
CDVAC_25	6,6	299,8
Coincidente	2,7	90,4

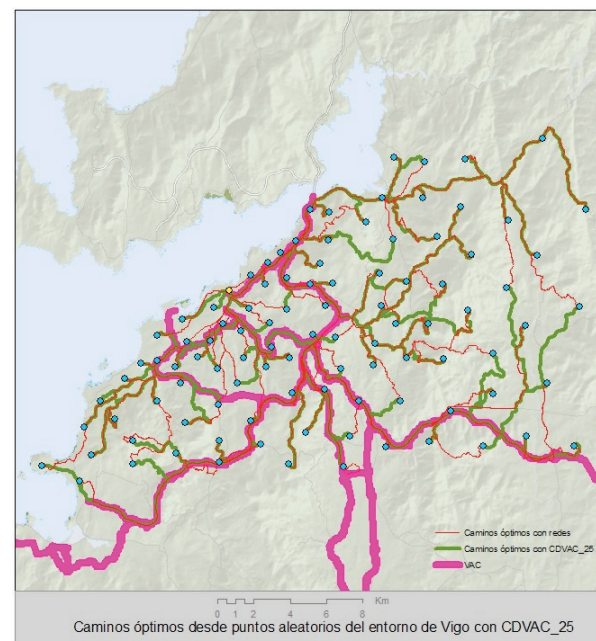


Figura 221. Caminos óptimos desde puntos aleatorios del entorno de Vigo calculados por análisis de redes vectoriales y a partir de los resultados por el método CDVAC con resolución de 25 metros.



Figura 222. Detalle de los trazados de los caminos óptimos calculados por análisis de redes y mediante el método de CDVAC con resolución de 25 metros.

Los tiempos obtenidos por ambos procedimientos para los 99 puntos considerados, reflejan que en general el método CDVAC ofrece valores menores que el análisis vectorial. Solo seis de ellos tienen un valor mayor que el obtenido por análisis de redes. Ello se debe a que son puntos que se encuentran distantes de la red viaria y en un punto que en la superficie de costes del modelo ráster posee una pendiente alta. En estos seis casos, la diferencia media se sitúa en el 18,8%, y una variación máxima del 63,9%. Para el resto de puntos donde el valor de CDVAC es menor que el calculado por análisis vectorial, la diferencia media alcanza el 19,3%, y la máxima 49,1% (Figura 223). El valor medio de los tiempos analizados en el procedimiento vectorial llega a 1.043 segundos, mientras que mediante CDVAC con resolución de 25 metros, se alcanza 857 segundos.

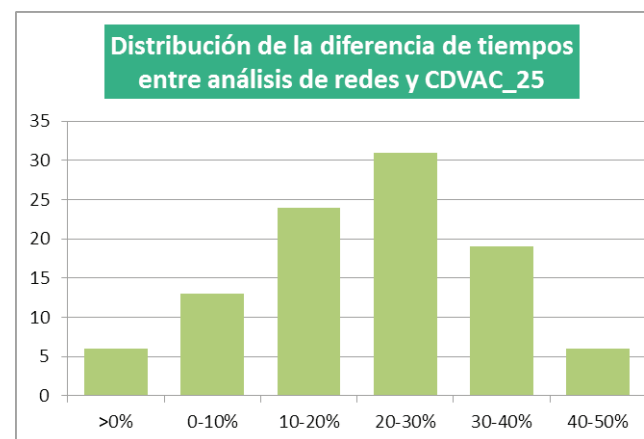


Figura 223. Distribución de la diferencia de tiempos entre el calculado por análisis de redes y por el método CDVAC con resolución de 25 metros.

Si hacemos la comparación entre los caminos óptimos obtenidos por análisis de redes vectoriales y los calculados mediante los resultados del método CDVAC aplicado con una resolución de 100 metros (CDVAC_100) (Figura 224), al reducir la precisión, la longitud de los caminos mínimos disminuye aún más con respecto a los obtenidos en el proceso vectorial, hasta suponer sólo el 65,6% del trazado hallado por análisis de redes. Los tramos coincidentes entre los caminos óptimos calculados por los dos métodos, representan entre el 28,7 y 38,8% del trazado CDVAC_100 (Tabla 68).

Tabla 68. Longitud y superficie de los caminos óptimos obtenidos por análisis de redes y por los resultados calculados mediante CDVAC con resolución de 100 metros.

Caminos óptimos	Superficie (Km2)	Km
Análisis de redes	41,3	396,8
CDVAC_100	23,2	260,2
Coincidente	9,0	74,7

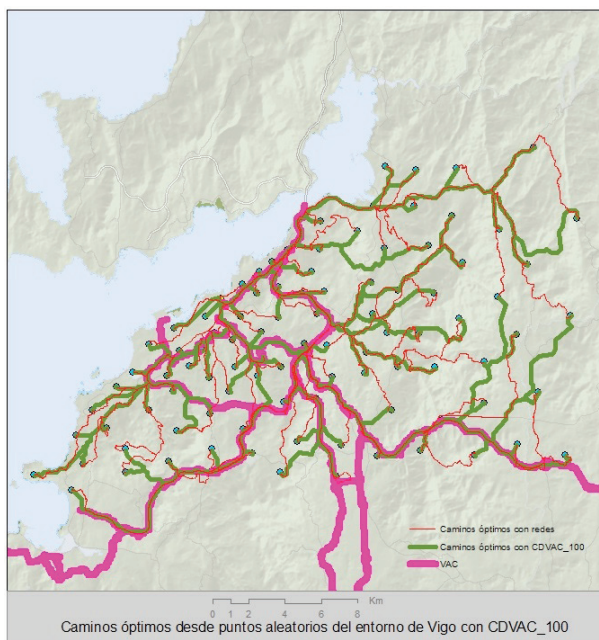


Figura 224. Caminos óptimos desde puntos aleatorios del entorno de Vigo calculados por análisis de redes vectoriales y a partir de los resultados por el método CDVAC con resolución de 100 metros.

Nuevamente los tiempos obtenidos el método CDVAC para los 99 puntos considerados, obtiene valores menores, en este caso con una variación media mayor que antes, pues llega al 35% (frente al 19,3% para CDVAC_25), con un máximo de 55,9%, llegando el valor medio de los tiempos calculados hasta 698 segundos. Al aumentar el tamaño de celda, en esta ocasión aparecen sólo dos puntos con un valor mayor que el obtenido por análisis de redes, pero con diferencias del 2,5 y del 10,4%, menores que antes (Figura 225).

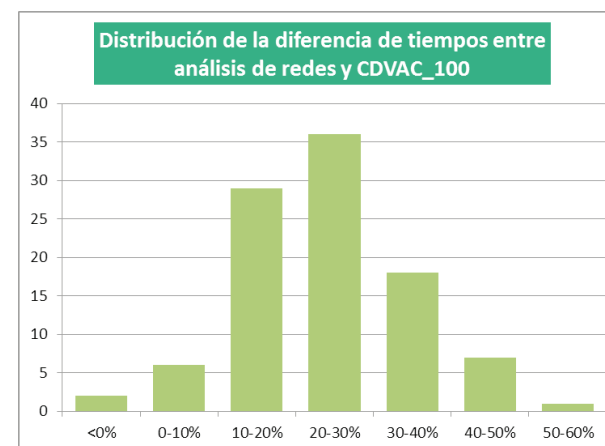


Figura 225. Distribución de la diferencia de tiempos entre el calculado por análisis de redes y por el método CDVAC con resolución de 100 metros.

Emplear el método de CDC con una resolución de 100 metros (CDC_100), supone ligeros cambios con respecto a los resultados vistos en el caso anterior. Se obtienen caminos óptimos¹⁴⁷ que ahora son coincidentes en aproximadamente un 70-75% con los trazados calculados en CDVAC_100. Los caminos disminuyen ligeramente menos ahora con respecto a la longitud conseguida por el procedimiento de análisis de redes. Sin embargo los tramos coincidentes entre los caminos óptimos calculados por CDC_100 y por el proceso vectorial,

¹⁴⁷ En el caso del método de Coste Distancia Condicionado (CDC), al no disponer de una única Superficie de Costes, no se puede aplicar el procedimiento normal de obtener los caminos óptimos a partir de las direcciones de desplazamiento seguidas en el tránsito por esa superficie de costes hasta llegar a la celda fuente. Por ello se aplica otro método más habitual en el análisis hidrológico, que permite encontrar las direcciones de flujo a partir de una superficie que normalmente representa las cotas del terreno. En este caso, sin embargo, sustituimos el supuesto MDT por los resultados del Coste Acumulado Global obtenidos con el procedimiento de CDC.

Las pruebas realizadas de este proceso, con los resultados obtenidos para CDVAC muestran coincidencias en los caminos óptimos del 90%, por lo que aceptamos como válido esta metodología para este análisis. Sin embargo, debemos señalar que la obtención de los caminos óptimos obtenidos por el procedimiento CDC preciserían de un proceso de cálculo más minucioso pues deberían considerarse las restricciones impuestas en los desplazamientos. Se necesitaría un estudio riguroso para obtener un resultado más realista, pero para esta investigación consideramos suficiente el proceso planteado.

mantienen cifras similares al caso anterior, con porcentajes un poco menores, de entre el 27 y 37,5% de su trazado CDC_100 (Tabla 69).

Tabla 69. Longitud y superficie de los caminos óptimos obtenidos por análisis de redes y por los resultados calculados mediante CDVAC con resolución de 100 metros.

Caminos óptimos	Superficie (Km2)	Km
Análisis de redes	41,3	396,8
CDC_100	24,0	273,9
Coincidente	9,0	73,8

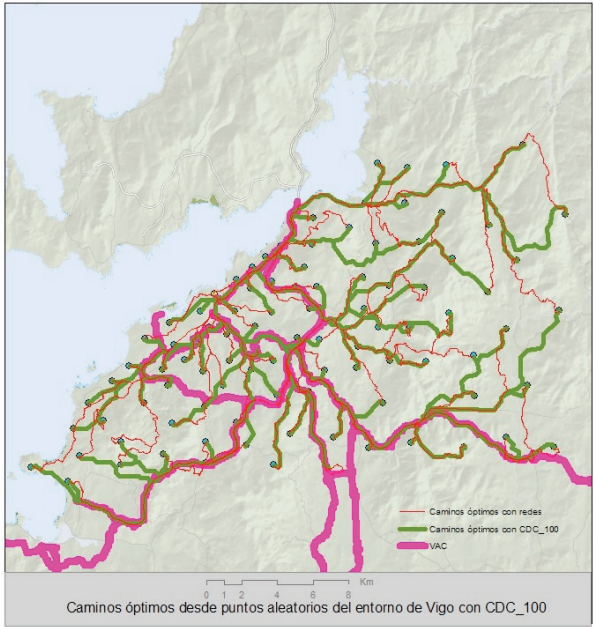


Figura 226. Caminos óptimos desde puntos aleatorios del entorno de Vigo calculados por análisis de redes vectoriales y a partir de los resultados por el método CDC con resolución de 100 metros.

Los tiempos obtenidos en el método CDC para los 99 puntos considerados, presentan una variación media menor que antes, pues no llega al 33% (frente al 35% de CDVAC_100), pero mayor que CDVAC_25 (que era del 19,3%). El máximo llega hasta el 58,1%. El valor medio de los tiempos calculados aumenta hasta 724 segundos. Siguen manteniéndose los mismos dos puntos con un valor ma-

yor que el obtenido por análisis de redes, pero con diferencias del 0,9 y del 16,3%. Observamos sin embargo que la mayoría de los puntos tienen una diferencia de tiempos entre 30 y 40% (Figura 227), a diferencia del caso de CDVAC_100.

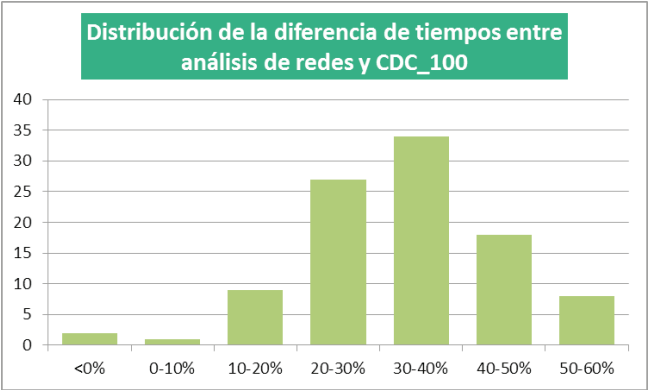


Figura 227. Distribución de la diferencia de tiempos entre el calculado por análisis de redes y por el método CDC con resolución de 100 metros.

Emplear el método de CDC con una resolución de 25 metros (CDC_25), supone ligeros cambios con respecto a los resultados vistos en el caso de CDVAC_25, sin embargo obtiene longitudes más largas, y por tanto más cercanas a las conseguidas mediante el análisis de redes (Figura 228). Los tramos coincidentes entre los caminos óptimos calculados por CDC_25 y por el proceso vectorial, mantienen cifras similares a los casos anteriores, con porcentajes de entre el 295 y 39,7% de su trazado CDC_25. Con respecto al trazado del proceso vectorial, el porcentaje de coincidencia llega al 27,1% que es el más alto de todos los resultados de caminos óptimos obtenidos con modelo ráster.

Tabla 70. Longitud y superficie de los caminos óptimos obtenidos por análisis de redes y por los resultados calculados mediante CDC con resolución de 25 metros.

Caminos óptimos	Superficie (Km2)	Km
Análisis de redes	10,2	396,8
CDC_25	6,9	315,1
Coincidente	2,8	91,5

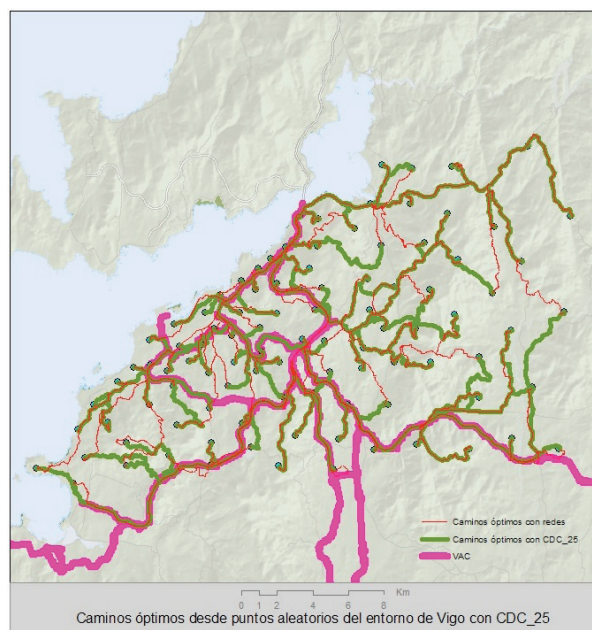


Figura 228. Caminos óptimos desde puntos aleatorios del entorno de Vigo calculados por análisis de redes vectoriales y a partir de los resultados por el método CDC con resolución de 25 metros.

Podemos apreciar las diferencias que supone utilizar el método CDVAC o el CDC aproximándonos a algunas de las conexiones de estos caminos óptimos con las Vías de Alta Capacidad. Apreciamos como el método CDVAC no tiene en cuenta los enlaces y toma el camino directo hasta conectar con el trazado de las VAC. Por su parte, el procedimiento seguido por CDC obliga a que los trayectos conecten con las VAC en los Enlaces previamente definidos (Figura 229).

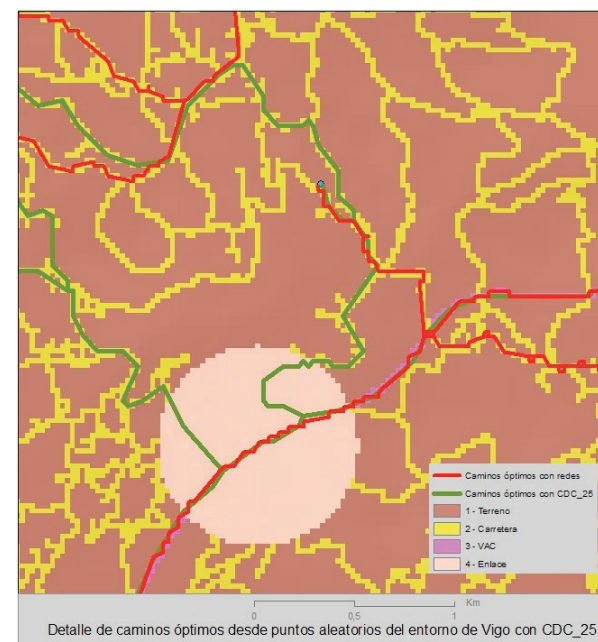


Figura 229. Detalle de la conexión con las VAC de los caminos óptimos desde puntos aleatorios del entorno de Vigo calculados por análisis de redes vectoriales y a partir de los resultados obtenidos por el método CDC con resolución de 25 metros.

Los tiempos obtenidos en el método CDC_25 para los 99 puntos considerados, presentan la menor variación media de todos los métodos, pues no llega al 15% de diferencia con respecto a los valores del análisis de redes. El valor medio de los tiempos calculados aumenta hasta los 904 segundos, lo que supone un 87% del valor medio obtenido por el análisis de red, la mejor aproximación de todos los cálculos (Ver ANEJO 3). La mayoría de los puntos tienen una diferencia de tiempos entre 10 y 20% (Figura 230), a diferencia de los casos anteriores.

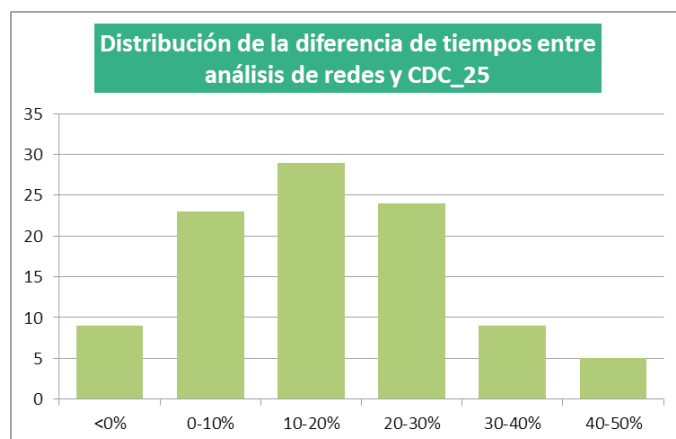


Figura 230. Distribución de la diferencia de tiempos entre el calculado por análisis de redes y por el método CDC con resolución de 25 metros.

Si hacemos un análisis sobre los tiempos calculados desde las capitales de municipio (Figura 231) en el ámbito de estudio hasta la ciudad de Vigo mediante el análisis de redes vectoriales y los métodos de CDC y CDVAC (para resolución de 25 metros y de 100 metros) observamos que para la misma resolución los valores de estos métodos son similares. A mayor resolución, es decir, con un tamaño de celda menor, se consiguen mejores precisiones en la representación de las infraestructuras viarias, y por tanto, tiempos de cálculo más cercanos a los obtenidos mediante el procedimiento de análisis vectorial que ofrece un valor medio de 2.007 segundos. Para CDVAC_25 las diferencias medias se sitúan en 15,9%, y para CDC_25 en 15,7%. Por su parte CDVAC_100 y CDC_100 tienen variaciones mayores, alcanzando 23,5% y 23,3%. Vemos como, en general, al alejarnos del lugar fuente de desplazamientos las diferencias entre el método de análisis vectorial y los métodos ráster, disminuyen, salvo en el caso del método CDC con mayor resolución, donde aumenta ligeramente. CDC_25 es la que ofrece la mejor aproximación a los tiempos calculado por análisis de red con un 85,2% (ver Anejo 4).

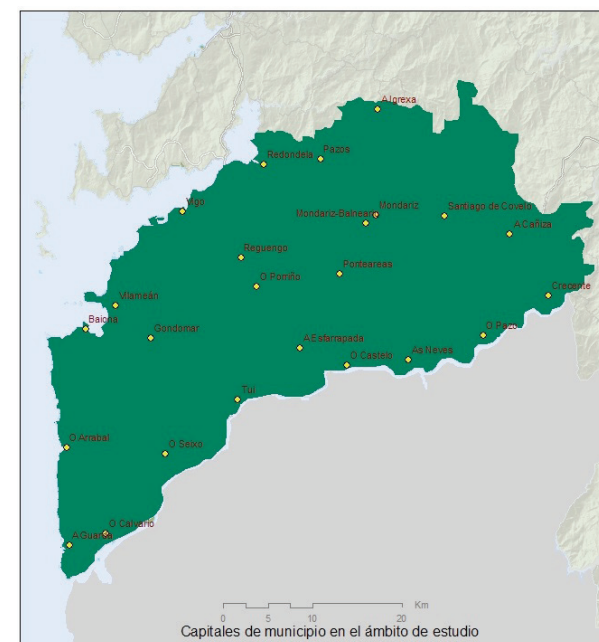


Figura 231. Capitales de municipio en el ámbito de estudio.

6.2.4. Conclusiones sobre el análisis de precisión del método CDC

Una disminución del tamaño de celda de análisis para emplear en el método de Coste Distancia Condicionado (CDC), es decir, aumentar la resolución de los datos de entrada, significa un aumento en los costes acumulados calculados. Como hemos comprobado, pasar de una resolución de 100 metros a una de 25 metros, supone un aumento medio en los costes acumulados de más del 15%, y aproximadamente el 30% para el valor máximo que se obtiene en el proceso.

Los cálculos son más precisos, con lo que casi desaparecen las celdas con valor de CDC menores a los obtenidos en el método de Coste Distancia considerando las Vías de Alta Capacidad (CDVAC), y que con una resolución de 100 metros suponían más del 50% de la superficie del ámbito geográfico de estudio. Con la resolución de 25 metros las celdas que no varían su valor entre ambos mé-



todos suponen un 30% de la superficie, cuando con la resolución de 100 metros, se asumía que el 60% de la superficie prácticamente no variaba de valor.

La mejor precisión de los cálculos hace que las superficies de tiempos cercanos a las celdas fuente se reduzcan, y aumenten por tanto las áreas de las zonas lejanas, hasta duplicar las superficies obtenidas con resoluciones menores.

Para los ensayos realizados, aumentar la resolución no significa que las diferencias en los costes acumulados calculados entre CDVAC y CDC aumenten. De hecho, el porcentaje de variación media de los costes acumulados entre calcularlos por CDVAC_25 o por CDC_25 sólo representa un 2,4%, menos que en el caso de la resolución de 100 metros, donde se llegaba al 4,4% de media para el ámbito de estudio. Sin embargo las diferencias medias más elevadas, que observamos en la franja de un kilómetro con respecto al trazado de las VAC, sí que aumentan. En esa zona se obtienen 76,3 segundos de media en el análisis de 25 metros de resolución, frente a 68,3 segundos con resolución de 100 m, lo que significa un aumento de casi un 12%.

El mejor comportamiento de la resolución de 25 metros también se observa al comparar los resultados obtenidos por CDC y CDVAC con los tiempos calculados sobre puntos de control en el ámbito geográfico mediante el procedimiento de análisis de redes vectorial. Se comprueba que en general los métodos de cálculo de accesibilidad ráster obtienen costes acumulados menores a los calculados por el método vectorial. Para una resolución de 100 metros, con los casi 100 puntos de control analizados, se observan diferencias medias de entre el 30 y el 35%, que se reducen al 20% para CDVAC_25 y para el 15% con CDC_25, que es quien presenta los resultados más cercanos a los obtenidos por análisis de red.

En este análisis comparativo entre el método vectorial y el ráster, también se detectan diferencias máximas que sobrepasan en algún caso el 50% del valor vectorial. Es especialmente significativa la aparición de puntos con mayor valor en los métodos ráster que en el análisis de redes. Hemos comprobado que ello se debe a que corresponden a lugares alejados de una carretera, y normalmente en zonas de pendiente elevada. El análisis vectorial no tiene en cuenta

la dificultad de acceder a la carretera más próxima, más allá de considerar la distancia en línea recta que la separa del punto de control. Sin embargo el método de Coste Distancia considera la superficie de fricción existente en el lugar, lo que ofrece un coste acumulado final más alto, y posiblemente más realista.

En definitiva, se observa que el método Coste Distancia Condicionado ofrece la misma validez para resoluciones distintas, aunque para tamaños de celda menores, los costes acumulados calculados, son más precisos, como se comprobó comparándolos con los obtenidos con análisis de redes vectoriales. Pese a que los resultados alcanzados con este método son similares a los obtenidos con el método de Coste Distancia considerando las Vías de Alta Capacidad, se comprueban diferencias que pueden ser especialmente significativas en el entorno de los primeros cinco kilómetros desde el trazado de estas infraestructuras viarias específicas.






7 Conclusiones



7. Conclusiones

En las últimas décadas, y especialmente en los últimos años, la sociedad de la información ha incorporado la componente geográfica de los datos a la vida cotidiana del ciudadano. El uso de la cartografía se ha generalizado fundamentalmente gracias a aplicaciones basadas en Internet y en redes de comunicación móviles capaces de posicionar y buscar información diversa sobre un mapa global. Según estudios propios de Google, más de la mitad de las búsquedas de carácter local en este buscador, ya se realizan sobre su aplicación para la gestión de mapas, Google Maps. Y la tendencia va en aumento, puesto que como se defiende en esta tesis, **cualquier dato manejado por el hombre es susceptible de georreferenciarse**. Sin embargo, la ingeniería civil en general, y las infraestructuras viarias en particular, aún necesitan un importante impulso para aprovechar las Tecnologías de la Información Geográfica en su metodología habitual de trabajo. Las oportunidades que ofrecen los avances en la incorporación de datos geográficos de forma automática a partir de la teledetección, por imágenes tomadas desde los satélites, mediante los sistemas de posicionamiento o a través del empleo de los datos procedentes de LiDAR, posibilitan nuevos usos y nuevas formas para el análisis de la información territorial, que deben incorporarse al ámbito de la ingeniería civil.

La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), como integradores de todas estas tecnologías, para analizar y gestionar las infraestructuras viarias, representa actualmente un importante reto en este sector, y su implementación será clave para el desarrollo futuro de las carreteras como servicio al ciudadano. Para conseguir análisis más eficientes de las características funcionales de las carreteras, en la memoria se plantean diferentes métodos desarrollados sobre un **SIG, entendido como aquella tecnología que integra mediante medios informáticos, diferentes funcionalidades para gestionar, analizar y presentar cualquier dato, aprovechando su componente espacial**. El SIG debe manejarse como un sistema abierto, dinámico y flexible en el que se combinen todos estos elementos regidos de forma clara y organizada por las personas, que en último término le darán operatividad, para organizar tareas de apoyo a la gestión, como modelizador de procesos



de análisis para la toma de decisiones o simplemente como aglutinador y difusor de información de interés para un organismo, o para el ciudadano en general. Aunque la tecnología haya avanzado mucho en los últimos años, y en el ámbito de las carreteras aparecen ciertas aplicaciones que utilizan la información geográfica y los SIG como instrumento de apoyo a las tareas de los gestores de estas infraestructuras, lo cierto es que todavía es necesario ajustar metodologías generales empleadas en los SIG, a las especificidades propias del sector de la ingeniería de carreteras.

El estudio de la historia de los caminos nos muestra la necesidad que siempre tuvo el hombre de moverse por el territorio para satisfacer unas necesidades cada vez más complejas, como el propio sistema social y económico de la época de ese viario. La transformación de la red viaria de una región es el fiel reflejo de la evolución de un pueblo, y las carreteras constituyen un patrimonio y un recurso considerable que la colectividad ha heredado de las generaciones pasadas y presentes (Madelín, y otros, 1999). Y que sigue ofreciendo un servicio de vital importancia en nuestra sociedad, pues la red viaria actual soporta aproximadamente entre el 75% y el 90% del transporte interior en todos los países el mundo. Debe asegurarse que las infraestructuras viarias mantengan su función de movilidad dentro del territorio, permitiendo una circulación rápida, cómoda, económica y segura de los vehículos automóviles (Kramer, Pardillo, Rocci, Romana, Sánchez Blanco, & Val, Ingeniería de Carreteras, 2003). Pero además debe permitirse el acceso de aquellos puntos del territorio que estén habitados o sean de interés para el desarrollo social o económico de una región. Para conseguirlo, los responsables de estas infraestructuras deben fomentar una buena conservación y eficiencia de la red viaria, analizando las carreteras desde el punto de vista de la funcionalidad que aportan sobre las diferentes relaciones territoriales a las que da soporte.

El carácter público que define una carretera surge de entenderla como un servicio de carácter social debido a la trascendental importancia que tienen para la calidad de vida y el desarrollo económico, cultural y social de cualquier región. Tradicionalmente para determinar las prioridades de inversión en ca-

rrteras o en su conservación, se realizan análisis económicos de rentabilidad de los proyectos, complementados en algún caso con informes de evaluación de impacto ambiental. Sin embargo, en general este planteamiento se olvida de abordar cuestiones sociales, en donde deben aplicarse métodos multicriterio para ayudar en el proceso de priorización (Ghellab, W.D.H. Roberts, Rmili, Retour, Lanet, & Tapio, 1999). Es común estudiar las redes viarias a partir de parámetros e índices relacionados con las propias características técnicas de las infraestructuras (longitudes, anchos, pavimentos, etc.), pero faltan estudios estadísticos sobre la accesibilidad, como verdadero índice social del servicio que prestan estas infraestructuras. Se puede afirmar que el potencial de análisis que la accesibilidad podría aportar sobre la planificación de transporte aún no se aprovecha plenamente (Geurs & Ritsema van Eck, 2003). Y sobre este aspecto, con la presente investigaciónse pretende aportar nuevos métodos que ayuden a calcular con mayor facilidad y precisión esos índices de accesibilidad.

En la planificación territorial es clave determinar y cuantificar las desigualdades existentes en una región, e intentar buscar una organización territorial equilibrada, facilitando la localización de aquellas carreteras o corredores sobre los que resultará más interesante elaborar un programa de actuaciones que solucione, o corrija en parte, las deficiencias de accesibilidad encontradas, y estableciendo a partir de ahí, nuevas potencialidades de desarrollo en la región. Aunque no es el único factor responsable, una red viaria con un correcto funcionamiento incide positivamente en la mejora del bienestar social, dotando de un adecuado servicio de comunicación a todos los habitantes de la región, aumentando su grado de participación en la comunidad, y favoreciendo el acceso a equipamientos y servicios básicos, así como el establecimiento de nuevas actividades económicas, como muestran los trabajos desarrollados en este campo desde el Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá de Henares (Plata-Rocha, Gómez-Delgado, & Bosque-Sendra, 2011)(Moreno Jiménez & Bosque Sendra, 2010)(Aguilera Benavente, Plata Rocha, Bosque Sendra, & Gómez Delgado, 2009)(Plata Rocha, Gómez Delgado, & Bosque Sendra, 2009)(Madieto Ruz & Bosque Sendra, 2006)(Bosque Sendra & Palm



Rojas, 2006)(Gómez Delgado & Bosque Sendra, 2004)(Bosque Sendra, Gómez Delgado, Moreno Jiménez, & del Pozzo, 2000)...

Los modelos para el cálculo de la accesibilidad sobre Sistemas de Información Geográfica, especialmente por permitir incorporar y combinar datos muy diversos en múltiples ámbitos (Huxhold, 1991), se presentan en la actualidad como una de las herramientas más adecuadas para valorar el impacto territorial (López et al., 2009) y la funcionalidad que ofrece una red viaria, pudiendo evaluar el bienestar de una población en su intento de alcanzar un territorio más equitativo, justo y sostenible para quienes lo habitan. El análisis de accesibilidad permite entender las carreteras como un elemento del territorio con una función concreta de servicio y transporte, sobrepasando el enfoque que las reduce a unas características geométricas con un nivel de seguridad y de servicio que, aun siendo necesario e importante su conocimiento, aíslan la carretera de su contexto territorial.


La accesibilidad aporta un conjunto de técnicas de gran capacidad para modelizar la realidad y sintetizarla en unos resultados numéricos y cartográficos que reflejan la calidad de las comunicaciones, desde múltiples perspectivas. Su sencillez permite una rápida comprensión por parte de técnicos y ciudadanos en general, lo que le confiere un importante papel en los trabajos de planificación. La complejidad de los componentes que pueden participar en los cálculos de accesibilidad (calidad de infraestructuras de transporte, potenciales de oferta y demanda de los lugares, condiciones específicas temporales o espaciales, preferencias y necesidades personales, etc.) hacen que el concepto de accesibilidad se haya estudiado desde múltiples puntos de vista, como demuestra por ejemplo los proyectos de accesibilidad desarrollados desde el Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT) de la Universidad Politécnica de Madrid y del Grupo de Transporte, Infraestructuras y Territorio de la Universidad Complutense de Madrid (Condeço-Melhorado, Gutiérrez, & García-Palomares, 2011)(López Suárez, Mancebo Quintana, Ortega Pérez, & Monzón de Cáceres, 2008)(Ortega Pérez & Monzón de Cáceres, 2010)(Gutiérrez, Condeço-Melhorado, & Martín, 2010)(López et al.,

2009)(Ortega Pérez, Mancebo Quintana, López Suárez, & Monzón de Cáceres, 2008)(Ortega, Mancebo, Sánchez, & López, 2005)(López Suárez, 2007)(López Suárez, 2008)(Pérez, Quintana, & Suárez, 2006)(Martín, Gutiérrez, & Román, 2004)(Cascajo Jiménez, 2004)(Gutiérrez Puebla, 2001)...

Ya sea en formato vectorial o en formato ráster, las propiedades de los SIG lo convierten en un interesante instrumento para el cálculo de índices territoriales sobre datos geográficos reales en formulaciones y modelos conocidos. Sin embargo, el formato ráster consigue un modelo continuo del territorio muy adecuado para aplicar análisis basados en una superficie de coste acumulado (SCA; o ACS-Accumulated Cost Surface- en inglés) que propuso (Warntz, 1965), y que presenta grandes ventajas frente al análisis de redes basado en el formato vectorial:

- Es más sencillo de implementar sobre SIG que el modelo vectorial (Bemmelen et al., 1993)
- Evita tener que disponer de una red topológica con los elementos perfectamente conectados
- Calcula la accesibilidad en cualquier punto del territorio, y no sólo en los nodos de la red

Por ello, en la actualidad, el modelo basado en una superficie de coste acumulado (SCA), también conocido como algoritmo de Coste Distancia (Longley et al 2005) o de Costes de Recorrido (Bosque Sendra & Moreno Jiménez, 2004) o de Acumulación de Costes (Lage Reis-Correia, 2010), es la técnica más común para el análisis de los movimientos a través de una superficie continua, siendo empleada en estudios, análisis y trabajos de planificación de grandes áreas, pues no restringen los desplazamientos sólo a la red de carreteras e incorporan la movilidad a través del terreno (Ebener et al., 2005). Trabajos como los abordados desde el Laboratorio del Territorio (LaboraTe) de la Universidad de Santiago de Compostela, para la utilización de modelos de simulación basados en autómatas celulares en la planificación rural y urbana (A. M. García, Santé, Boullón, & Crecente, 2013; Andrés M. García, Santé, Boullón, & Crecente, 2012; Santé, García, Miranda, & Crecente, 2010; Santé-Riveira, Cre-



cente-Maseda, & Miranda-Barrós, 2008), podrían modificar en el futuro del SIG esta tendencia, al igual que otras iniciativas tecnológicas (VORTAL, DTs, RRTs, ANN, etc.) (de Smith, 2004). Sin embargo, el modelo basado en las SCA ha resuelto muchos análisis territoriales y sigue mostrando mucho potencial en los cálculos de accesibilidad. Desde su planteamiento inicial, este modelo SCA ha ido mejorándose y generando diferentes adaptaciones para permitir resolver diferentes problemas que sobre él se fueron detectando, como por ejemplo atender mediante un MDE a la planificación de posibles puentes o túneles que permitan determinar rutas óptimas de menor longitud (Yu et al., 2003), o establecer un algoritmo de cálculo de rutas de menor coste, también sobre un MDE, donde se favorecen los recorridos con menor diferencia de pendiente, similar a como se diseñan y construyen los trazados de caminos y canales (Collischonn & Pilar, 2000).

La versatilidad del algoritmo Coste Distancia ha permitido, hasta conseguir que el modelo ráster pueda funcionar con prácticamente las mismas capacidades que demuestra el modelo vectorial mediante el análisis de redes, aportando un amplio conjunto de funciones de conectividad entre las celdas del ráster que sean de un mismo tipo (Husdal, 2000). A pesar de todo, en estos planteamientos sigue sin resolverse el efecto barrera que ejercen determinadas infraestructuras lineales sobre los desplazamientos territoriales, y que como enunció (de Smith, 2004), requiere enfoques de optimización más sofisticados. Tomlin sugiere la necesidad de disponer de un método para identificar celdas conectadas mediante una tabla, independientemente de su cercanía. Aunque este algoritmo requeriría un cierto ingenio para su codificación, los beneficios que aportaría serían considerables (Husdal, 2000).

Siguiendo todos estos planteamientos, en la tesis hemos intentado buscar nuevos enfoques metodológicos para tratar adecuadamente los datos viarios, de forma que se puedan conseguir análisis más completos que ayuden a gestionar más eficientemente las infraestructuras viarias. En primer lugar **se plantea un método basado en la parametrización mediante geometría de secuencia de puntos**, con el que se consigue caracterizar todas las variables

técnicas y funcionales que afectan directa o indirectamente, a una carretera. También **se desarrollan dos métodos para el cálculo de accesibilidad, el método de Suma de Costes Parciales y el algoritmo Coste Distancia Condicionado**, que aprovechan las capacidades del modelo Coste Distancia, mejorándolo para superar los inconvenientes que introducen los modos de desplazamiento especializados con limitación de accesos, y que generan un efecto barrera en el territorio, como por ejemplo ocurre en autopistas y autovías. El algoritmo Coste Distancia Condicionado, añade condiciones específicas en los desplazamientos permitidos entre las celdas, en cierta medida, resolviendo el reto planteado por Tomlin, que comentamos. Pero además de conseguir modelar con gran fiabilidad cualquier modo transporte sobre la superficie terrestre, ofrece nuevas posibilidades de análisis sobre los modelos ráster gracias a la aplicación de restricciones condicionadas en los cálculos a ejecutar entre celdas vecinas.

El **método de parametrización mediante geometría** de secuencia de puntos permite asignar multitud de parámetros a cada sección del viario, representada por un punto georreferenciado. Los datos pueden provenir de distintas fuentes a través de diferentes tecnologías, y gracias a los SIG es posible incorporar información nueva a cada punto a través de geoprocursos de enlace espacial. Para ello se plantean estrategias de asignación puntual de información o bien mediante asignación por tramos, entre dos puntos concretos del trazado. Es habitual en carreteras de rango superior disponer de vehículos de medición de geometrías que permiten hacer un inventario masivo de múltiples variables técnicas de los trazados, por lo que esta podría ser una fuente importante de información para aplicar el método. Pero no es imprescindible, como también hemos reflejado mediante la aplicación de este método para el estudio del Camino Francés en Galicia, donde la información se recopiló manualmente, y paso a paso.

Una vez incorporados debidamente los datos en cada uno de los puntos de la geometría que define los viales, es posible operar sobre ellos para obtener nueva información. Por ejemplo, como hemos hecho en este trabajo para



conseguir la velocidad media de los tramos viarios en carreteras autonómicas aprovechando la información de la sección transversal y de los datos de tráfico, y aplicando el procedimiento descrito en el Manual de Carreteras. O también, mediante la elaboración de nuevos indicadores que operan con los datos almacenados en cada punto para conseguir una visión más genérica sobre algún aspecto de interés, como hemos realizado para el Camino de Santiago.


El método propuesto contempla la posibilidad de realizar simplificaciones geométricas de la información en secuencia de puntos mediante la tramificación temática según los aspectos que se necesite. Para establecer cada tramo, se unen aquellos puntos consecutivos que reúnan unas condiciones fijadas previamente. La clave para la transformación de toda esta información de un modo rápido y eficaz, es aprovechar el carácter secuencial de los datos de partida, logrando una operatividad de cálculo con un bajo coste computacional. Así se recorren la totalidad de la base de datos, punto por punto, operando con los campos involucrados en la tramificación, realizando cálculos matemáticos y editando las geometrías lineales resultantes. Pueden aplicarse diferentes criterios para establecer la división de los tramos, bien a través de elementos concretos que se fijen como punto de corte, o bien mediante la asignación de características homogéneas que identifiquen un tramo por los valores que contienen determinados campos. Con ello se consigue disponer de la información viaria de interés en un formato gráfico más manejable por los SIG, y ejecutar a partir de ahí nuevos análisis geoespaciales sobre esos datos lineales.

Los resultados obtenidos en los análisis realizados en la investigación confirman la validez de este método de parametrización puntual mediante geometría de secuencia de puntos, para tratar y analizar de forma exhaustiva las características técnicas y funcionales de una red de infraestructuras viarias. Se muestra su versatilidad para manejar cualquier tipo de dato medido sobre las secciones de las carreteras, y operar sobre ellos para obtener nueva información aplicando procedimientos contrastados o mediante nuevos planteamientos de análisis de la información. Este método se muestra de especial

interés para su aplicación proyectos de caracterización viaria, permitiendo la correcta estructuración y procesado de la información, y dotando al investigador de una capacidad analítica excepcional, al poder vincular sobre estos puntos cualquier otro tipo de información geográfica de la zona donde se sitúan. Además su operatividad permite ahorrar tiempos en la adquisición de datos, pues no es preciso recopilar toda la información de un trazado, sino sólo los puntos donde hay cambio de algún parámetro, como se demostró en el estudio del Camino Francés.

Este método se muestra especialmente idóneo para trabajar con información variable de las carreteras, o de datos que su funcionamiento. Un ejemplo podrían ser algunos de los trabajos del SINTEC (Simulación y Nuevas Tecnologías en Tráfico y Seguridad Vial) como centro de investigación interdisciplinar perteneciente al Instituto de Investigación en Tráfico y Seguridad Vial (INTRAS) de la Universidad de Valencia, en donde es necesaria una representación geográfica de las condiciones de conducción en la que se analizan multitud de parámetros en cada punto del trayecto, tanto del propio trazado de la carretera, como del vehículo y del conductor (Balsa-Barreiro, Valero-Mora, Berné, & Varela, 2013). Aplicado a sistemas de gestión de tráfico en los que se disponga de datos de navegación por satélite tipo GNSS (ya sean GPS, GLONASS o del futuro sistema Galileo), se podría anticipar la conducción en un punto al conocerse de antemano las condiciones geométricas del siguiente tramo. También se podrían establecer múltiples estudios de la carretera desde diferentes perspectivas en donde cada tramo de la carretera adquiera un valor según las condiciones de ella misma o del entorno, como por ejemplo en los trabajos de valoración del patrimonio histórico de las carreteras españolas (Rodríguez Lázaro, Coronado Tordecillas, Ruiz Fernández, & Vega Muñoz, 2007), o los de análisis del paisaje vinculado a estas infraestructuras (Brinckerhoff Jackson, 2011) (Español Echániz, 2008).

La parametrización puntual mediante geometría de secuencia de puntos también presenta ventajas para incorporar de forma rápida, sencilla y efectiva, la información de las carreteras sobre entidades lineales dentro de un Sistema



de Información Geográfica (SIG), tanto en formato vectorial como en formato ráster. En este último caso, la aplicación de la información viaria es fácilmente aplicable sobre métodos para el cálculo de accesibilidad, como por ejemplo mediante el algoritmo Coste Distancia, en donde hemos valorado la utilidad de obtener y emplear la velocidad media en los tramos de carreteras, en lugar de emplear una velocidad tipo para toda la red viaria de una titularidad. Este análisis genera resultados que ofrecen una variación considerable en los costes acumulados calculados, con más del 15% de la superficie con cambios medios superiores al 15%, pese a que las celdas que varían de velocidad en los datos de partida, representan menos del 4% del ámbito.

En cuanto a los métodos para el cálculo de accesibilidad propuestos en la tesis, el de **Suma de Costes Parciales** posee un planteamiento teórico más sencillo, pues se basa en dividir el camino entre dos puntos usando una vía de alta capacidad (VAC), en función de los recorridos parciales entre esos dos puntos y los enlaces de la VAC. Pese a emplear únicamente el algoritmo Coste Distancia, tal y como este funciona, la operativa a realizar requiere tres cálculos de este algoritmo diferentes, y una sistematización muy rigurosa de las operaciones. Esto hace que su operatividad no sea sencilla, ni esté al alcance de cualquier usuario de SIG. Además los resultados, contrastados con otros métodos, ofrecen ciertas divergencias debidas a la obligatoriedad que se impone en el proceso de cálculo para que un punto acceda a su enlace VAC más cercano. Puede ocurrir que en función de la celda fuente que se considere, esa opción no sea la que genera menor coste de desplazamiento, e interesaría acceder a otro enlace con el que se consigue una ruta más corta, aunque inicialmente se encuentre más distante del punto considerado. Por ello, aunque este método considera el acceso a las VAC únicamente en los enlaces de las mismas, mejorando la operativa que ofrece el algoritmo Coste Distancia para atender a estas infraestructuras, muestra ciertas limitaciones que se pretenden evitar con la propuesta del otro método.

El **método de Coste Distancia Condicionado (CDC)** plantea un algoritmo ráster más complejo, en el que es territorio a analizar se divide en celdas agru-

padas en diferentes zonas de desplazamiento, y mediante una matriz se definen las restricciones para que unas zonas se comuniquen con las otras. Se permite que ciertas zonas tengan un desplazamiento condicionado pues representan modos o infraestructuras de transporte que tiene accesos limitados o condiciones de movilidad específicas. Estas zonas de desplazamiento condicionado forman parte de un Espacio de Desplazamiento Condicionado en el que además de ella existe otra zona de desplazamiento que sirve como nodo de conexión entre la zona condicionada y el resto del territorio. Cada zona de desplazamiento tendrá asignado un coste de movilidad o fricción, que estará recogido en la Superficie de Coste Simple. Las zonas de desplazamiento condicionado tendrán además unos costes específicos recogidos en una Superficie de Coste Condicionado para cada Espacio de Desplazamiento Condicionado. La operativa del algoritmo permite calcular costes acumulados simples o condicionados en función de las zonas que se comunican, de las restricciones impuestas y de las superficies de costes a emplear.

El funcionamiento del algoritmo CDC permite modelar adecuadamente las conexiones de una red viaria compleja en donde existan limitaciones de accesos en algunas de ellas, y unos viarios se superpongan sobre otros, por ejemplo en cruces a distinto nivel. En los ensayos realizados en la investigación se muestra el correcto funcionamiento del algoritmo, en comparación con el Coste Distancia, alcanzando valores de coste acumulado superiores a este, al considerar los efectos barrera de los trazados VAC, y no permitir el acceso a estos viales en cualquier punto de su trazado, limitando este acceso a los enlaces establecidos. Con los datos manejados en la zona de análisis seleccionada en el sur de la provincia de Pontevedra, los resultados reflejan variaciones que en global suponen cambios entre el 4% y 13%, dependiendo el número de celdas fuente y la resolución usada, si bien se observan variaciones mucho más altas en zonas puntuales, especialmente en las proximidades a los trazados VAC. Sin embargo creemos que el modelo aplicado en una región con menor densidad viaria, y enlaces de las VAC distanciados en mayor longitud, las diferencias serían mucho mayores.




Como planteamientos de investigaciones o análisis futuros respecto a estos ámbitos incluidos en este proyecto, se consideran los siguientes:

- La parametrización de geometrías en secuencia de puntos ofrece enormes posibilidades como apoyo a la gestión eficiente de infraestructuras lineales, por lo que se pretende profundizar en la búsqueda de aplicaciones que permitan a los técnicos manejar con mayor facilidad toda la información relativa a una red de carreteras.
- Aunque en la memoria se ha utilizado un análisis isotrópico de movilidad, y no se han empleado ni restricciones de giros ni sentidos de circulación, el algoritmo Coste Distancia Condicionado implementado sobre un análisis anisotrópico podría perfectamente atender a estas circunstancias, por lo que se deja planteado para realizar en futuras mejoras del método de Coste Distancia Condicionado (CDC).
- Además se pretende aplicar el método CDC modelizando más zonas de desplazamiento (en función de vegetación, usos del suelo, cierres, edificaciones, lagos, hidrografía, etc.), y empleando más modos de transporte con movilidad condicionada (ferrocarril, bus, metro, etc.)
- Se pretende analizar con más profundidad la diferenciación en la accesibilidad al establecer más variaciones en los costes viarios, gracias a aplicar la velocidad media por tramo en todas las carreteras donde se tengan datos suficientes. En este sentido nos gustaría también emplear sistemas GPS para estudiar la velocidad en diferentes viarios, especialmente de la red local, para poder extrapolar velocidades según las características geométricas y técnicas de los tramos, y aplicar sus resultados en los cálculos de accesibilidad.
- Nos gustaría además aplicar este algoritmo CDC en diferentes zonas geográficas para contrastar adecuadamente los resultados en función de las características de la estructura viaria existente. En especial nos gustaría analizar el Eje Atlántico de Galicia, para evaluar la funcionalidad territorial de la AP-9 en toda su complejidad.

- Otra línea de trabajo futura podría ser buscar nuevos métodos para la obtención de los caminos óptimos por el procedimiento CDC, pues se precisaría de un cálculo más minucioso para considerar las restricciones impuestas en los desplazamientos.
- Una prioridad futura será publicar y difundir la herramienta de cálculo del algoritmo CDC para su aplicación desde gvSIG y SEXTANTE por parte de cualquier interesado, intentando crear un proyecto que permita recoger todas las experiencias de su uso en ámbitos diferentes. Se pretende recopilar sugerencias y problemas encontrados para mejorar su uso y ampliar sus posibilidades de utilización en sectores diferentes a las carreteras. En este sentido se pretende crear una línea de investigación que profundice en el establecimiento de condiciones para la ejecución de cualquier geoprocesamiento sobre SIG.

En cualquier caso, y pese a los nuevos estudios y análisis que planteamos realizar en un futuro próximo, creemos que la funcionalidad potencial del algoritmo Coste Distancia Condicionado amplía las posibilidades de uso en nuevos análisis geospaciales que estudien e interpreten diferentes fenómenos de dispersión, movilidad, propagación o desplazamiento que puedan ocurrir sobre la superficie terrestre, más allá de su aplicación directa sobre infraestructuras viarias o de transporte. No se ha encontrado en la bibliografía consultada ningún método similar al propuesto, y algunos planteamientos que podrían acercarse a modelar en ráster el comportamiento de la red viaria, como los comentados en (Husdal, 2000), son superados con el modelo Coste Distancia Condicional presentado en esta memoria.

En el SIG basado en el modelo ráster es habitual establecer geoprocesamientos que operan de forma iterativa desde una celda a las celdas vecinas, recorriendo todo el ámbito de estudio. Establecer previamente unas zonas que clasifiquen el territorio, y definir sobre ellas las restricciones que permitan o prohíban que esa operación geoespacial, pueda o no calcularse en función del origen y del destino de la conexión que se establezca, abre nuevos horizontes en los análisis geospaciales. Convenientemente estudiado el caso, podría



plantearse no solo que se restrinja o permita la ejecución de un algoritmo, sino que se ejecute una operación u otra diferente en función de cuáles sean las zonas origen y destino. Es decir, según estas celdas pertenezcan a zonas que presenten unas características previas que hagan recomendable tratamientos distintos en las operaciones, pero que puedan integrarse durante el mismo proceso de cálculo. Además el modelo permitiría operar de forma distinta entre dos zonas, según quién sea la zona origen y quién la zona destino, pudiendo realizar operaciones diferentes entre ellas en función de cuál sea el sentido de desplazamiento. El establecimiento de condiciones entre las zonas podría no sólo indicar la posibilidad de comunicación entre dos lugares, sino también implicar un coste añadido a ese tránsito. De esta forma se penalizaría o se favorecería el desplazamiento entre zonas específicas, lo cual podría recogerse mediante un factor numérico que se aplicaría sobre el coste de atravesar esas celdas, o bien simplemente un valor que se suma al coste calculado en ese desplazamiento.

En definitiva, la investigación desarrollada en esta memoria avanza en nuevos métodos basados en la utilización de Sistemas de Información Geográfica para aprovechar la componente espacial de los elementos que caracterizan las infraestructuras viarias, y de las entidades geográficas de su entorno, con la finalidad de realizar análisis geoespaciales que determinen con mayor eficiencia la funcionalidad de las carreteras en un territorio.



8. Bibliografía

- Adriaensen, F., Chardon, J. P., De Blust, G., Swinnen, E., Villalba, S., Gulinck, H., & Matthysen, E. (2003). The application of "least-cost" modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning*, 64(4), 233-247. doi:10.1016/S0169-2046(02)00242-6
- Aliseda Pérez de Río, P., Crespo del Madrid, R., & Yarza Álvarez, P. (1998). SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADOS A CARRETERAS.
- Aguilar Civera, I. (2010). Diccionario General de Arquitectura e Ingeniería de Pelayo Clairac. Ministerio de Fomento. CEDEX-CEHOPU.
- Aguilera Benavente, F., Plata Rocha, W., Bosque Sendra, J., & Gómez Delgado, M. (2009). Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos. *Revista Internacional Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, núm. 4, p. 57-80.
- Amoedo, A. L., Pérez, A. L., Oste, J. S., Marull, J., & Comunicación, R. (n.d.). INDICE DE CONECTIVIDAD ECOLÓGICA (ICE) CARRETERAS Y PERMEABILIDAD TERRITORIAL, 2(1), 1-18.
- Andes, D. (01 de marzo de 2006). GIS Lounge. Recuperado el 26 de diciembre de 2011, de The Components of GIS Evolve: <http://gislounge.com/the-components-of-gis-evolve>
- Balsa-Barreiro, J., Valero-Mora, P., Berné, J. L., & Varela, A. (2013). Representation of physical dynamic parameters from naturalistic driving data through GIS.
- Baradaran, S., & Ramjerdi, F. (2001). Performance of Accessibility Measures in Europe. *JOURNAL OF TRANSPORTATION AND STATISTICS AND STATISTICS*, 31-47.
- Barredo, J. I. (1996). Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Madrid: RA-MA Editorial.
- Batty, M., & Miller, H. J. (1996). Representing and Visualizing Physical , Virtual and Hybrid Information Spaces, 1-14.
- Baxter, R. S., & Lenzi, G. (1975). The measurement of relative accessibility. *Regional Studies*, 9(1), 15-26. doi:10.1080/09595237500185021
- Bemmelen, J. Van, Quak, W., Hekken, M. Van, & Oosterom, P. Van. (1993). Vector vs . Raster-based Algorithms for Cross Country Movement Planning. In *Auto Carto 11* (p. pages 304-317). Retrieved from <http://www.gdmc.nl/oosterom/autoca11.pdf>
- Black, M., Ebener, S., Aguilar, P. N., Vidaurre, M., & Morjani, Z. El. (2004). Using GIS to Measure Physical Accessibility to Health Care, 1-22.

BLANCO DE CÓRDOBA DEL ROSAL, César. La influencia de las carreteras locales en el análisis de accesibilidad territorial. II Congreso Nacional de Carreteras Locales. Asociación Española de la Carretera. Torremolinos, Marzo 1999.

Bosque Sendra, J. (1997). Sistemas de información geográfica. Ediciones Rialp.

Bosque Sendra, J., & García, R. C. (2000). El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 49-67.

Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., Moreno Jiménez, A., & del Pozzo, F. (2000). Hacia un sistema de ayuda a la decisión espacial para la localización de equipamientos. *Estudios Geográficos*, (241), pp. 567-598.

Bosque Sendra, J., & Moreno Jiménez, A. (2004). Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos. Madrid: RA-MA.

Bosque Sendra, J. G., & Palm Rojas, F. (2006). Un nuevo modelo para localizar instalaciones no deseables: ventajas derivadas de la integración de modelos de localización-asignación y SIG. *Cuadernos geográficos de la Univ. de Granada*, n° 39, pp. 53-68.

Bosque Sendra, J., Palm Rojas, F. J., & Gómez Delgado, M. (2007). LOCALIZA : una herramienta SIG para resolver problemas de localización óptima . I JORNADAS DE SIG LIBRE, (1), 16. Retrieved from <http://www.sigte.udg.edu/jornadas-siglibre2007/comun/2pdf/9.pdf>

Bosque Sendra, J., & Moreno Jiménez, A. (2012). Sistemas de información geográfica y localización óptima de instalaciones y equipamientos. Madrid: RA-MA.

Botella Plana, A., & Carles Olmedillas, J. (2011). Geotelemática. En A. Pérez Navarro, Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática (pág. 347). Barcelona: UOC.

Bradshaw, C. J. a., Lalas, C., & Thompson, C. M. (2000). Clustering of colonies in an expanding population of New Zealand fur seals (*Arctocephalus forsteri*). *Journal of Zoology*, 250(1), 105-112. doi:10.1017/S0952836900001096

Braudrillard. (s.f.). Wikipedia . Recuperado el 22 de 12 de 2011, de http://es.wikipedia.org/wiki/Jean_Baudrillard

Brinckerhoff Jackson, J. (2011). Las carreteras forman parte del paisaje. Gustavo Gili.

Buller, M. (2000). Network Analysis Algorithm Development & Implementation Authors.

Bunge, W. (1962). Theoretical Geography. Lund Studies in Geography .

Buzai, G. D., & Baxendale, C. A. (2006). Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Buenos Aires: GEPAMA.

Calvo Palacios, J. L., Jover, J., Pueyo, Á., & Alonso, P. (1993). Matizaciones de los valores cartográficos de accesibilidad por carretera de la España peninsular en función de la variable demográfica. IV Jornadas de la Población Española (págs. 191-200). La Laguna, Santa Cruz de Tenerife: Universidad de la Laguna.

Cardozo, O. D., Gómez, E. L., & Parras, M. A. (2009). Teoría de Grafos y Sistemas de Información Geográfica aplicados al Transporte Público de Pasajeros en Resistencia (Argentina). *Revista Transporte y Territorio*. 1, págs. 89-111. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.

Carreteras, D. G. (1999). Sistema de gestión de las actividades de conservación ordinaria y ayuda a la vialidad. Ministerio de Fomento.

Cascajo Jiménez, R. (2004). *METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE EFECTOS ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES DE PROYECTOS DE TRANSPORTE GUIADO EN CIUDADES*. Universidad Politécnica de Madrid.

Cebrián, J. A. (1992). Información geográfica y Sistemas de Información geográfica. Santander: Universidad de Cantabria.

Céspedes Agüero, M. V. (2006). Diseño de una red ecológica de conservación entre la Reserva de Biosfera La Amistad y las áreas protegidas del Área de. Costa Rica.

Colclough, J. G., & Owens, E. (2010). Mapping Pedestrian Journey Times using a Network-based GIS Model. *Journal of Maps*, 6.1 , 230-239.

Collischonn, W., & Pilar, J. V. (2000). A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(4), 397-406. doi:10.1080/13658810050024304

Comité de Desarrollo Territorial de Unión Europea en la Estrategia Territorial Europea, U. (1999). Estrategia Territorial Europea. Obtenido de http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/official/reports/pdf/sum_es.pdf

Condeço-Melhorado, A., Gutiérrez, J., & García-Palomares, J. C. (2011). Spatial impacts of road pricing: Accessibility, regional spillovers and territorial cohesion. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(3), 185-203. doi:10.1016/j.trra.2010.12.003

Cooper, J. (2010). MODELLING MOBILITY AND EXCHANGE IN PRE-COLUMBIAN CUBA: GIS LED APPROACHES TO IDENTIFYING PATHWAYS AND RECONSTRUCT-



- ING JOURNEYS FROM THE ARCHAEOLOGICAL RECORD. *Journal of Caribbean Archaeology*, (ISSN 1524-4776), 122-137. Retrieved from <http://www.flmnh.ufl.edu/jca/Cooper.pdf>
- De Juan Vigaray, M. D., & Rivera Camino, J. (1999). Los determinantes de la atracción comercial. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, 5, 15-34. Retrieved from dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/785050.pdf
- de Smith, M. J. (2004). Distance and Path. The development, interpretation and application of distance measurement in mapping and spatial modelling. Centre for Advanced Spatial Analysis, University College, London. Retrieved from <http://www.desmith.eu/MJdS/PDFS/dp.pdf>
- Demirel, H. (2002). An Integrated Approach to the Conceptual Data Modeling of an Entire Highway Agency Geographic Information System (GIS). Berlin.
- Diaz, B., & Bell, S. (1988). Spatial Data Processing Using Tesseral Methods (p. 425). Natural Environment Research Council for NERC Unit for Thematic Information Systems.
- DÍAZ FERNÁNDEZ, José Antonio. Las infraestructuras de transporte y comunicaciones como agentes del desarrollo económico regional de Galicia. En J.A. Díaz y R.C. Lois (eds.) "Las infraestructuras de comunicaciones y transportes en el desarrollo territorial de Galicia". Diputación Provincial de Pontevedra, Servicio de Publicaciones, Pontevedra, 2004. ISBN 84-8457-180-7.
- Díaz Grandío, D. (2012). Estudio de accesibilidad peatonal en el Campus de Elviña mediante Sistemas de Información Geográfica. Universidade da Coruña.
- Dijkstra, E. W. (1959). A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269-271. Retrieved from <http://www-m3.ma.tum.de/foswiki/pub/MN0506/WebHome/dijkstra.pdf>
- Dijst, M., & Kwan, M.-P. (2003). Accessibility and Quality of Life. In *Society, Behavior, and Private/Public Transport*.
- Douglas, D. H. (1994). Least-cost Path in GIS Using an Accumulated Cost Surface and Slope lines. *Cartographica*, 31(3), 37-51.
- Drew, K., Rowe, M., & Council, W. C. (2010). Effects of public transport intervention strategy in Bromsgrove and its environs : Opportunity in accessing Secondary Schools, 01(6), 2010.
- Drielsma, M., Ferrier, S., & Manion, G. (2007). A raster-based technique for analysing habitat configuration: The cost-benefit approach. *Ecological Modelling*, 202(3-4), 324-332. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.10.016
- Dupuy, G. (1998). El urbanismo de las redes. Teoría y métodos. Barcelona: Oikos-Tau.
- Eastman, J. R. (1985). Pushbroom algorithms for calculating distances in raster grids, 288-297.
- Ebener, S., Morjani, Z. El, Ray, N., & Black, M. (2005). Physical Accessibility to health care: From Isotropy to Anisotropy. Retrieved from http://www.who.int/kms/initiatives/Ebener_et_al_2005.pdf
- El-Geneidy, A., & Levinson, D. (2006). Mapping Accessibility Over Time. *Journal of Maps*, (October), 76-87.
- Español Echániz, I. (2008). La Carretera en el paisaje: criterios para su planificación, trazado y proyecto. Sevilla: Consejería de Obras Públicas y Transportes.
- Farrow, A., & Nelson, A. (2001). Modelación de la Accesibilidad en ArcView 3 Una extensión para calcular el tiempo de viaje y obtener información sobre captación de mercados por.
- Finnis, K., & Walton, D. (2008). Field observations to determine the influence of population size, location and individual factors on pedestrian walking speeds. *Ergonomics*, 51-6, 827-842.
- Fomento, M. De. (2010). Inventario de características geométricas y de equipamiento. Manual síntesis. Retrieved from <http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/F320EDE7-2EA1-437F-8EA9-265B80509237/103153/2010600.pdf>
- Galán Bueno, P. (1999). La red local y la accesibilidad como instrumentos del desarrollo territorial. II Congreso Nacional de Carreteras Locales. Torremolinos: Asociación Española de la Carretera.
- García, A. M., Santé, I., Boullón, M., & Crecente, R. (2013). Calibration of an urban cellular automaton model by using statistical techniques and a genetic algorithm. Application to a small urban settlement of NW Spain. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(8), 1593-1611. doi:10.1080/13658816.2012.762454
- García, Andrés M., Santé, I., Boullón, M., & Crecente, R. (2012). A comparative analysis of cellular automata models for simulation of small urban areas in Galicia, NW Spain. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(4), 291-301. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2012.01.001
- Garrido Palacios, J. (1995). La organización espacial de la red de carreteras en Aragón. Aplicación metodológica de la teoría de grafos. *Geographica*.
- Geurs, K. T., & Ritsema van Eck, J. R. (2003). Evaluation of accessibility impacts of land-use scenarios: the implications of job competition, land-use, and in-

- frastructure developments for the Netherlands. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30, pp. 69–87.
- Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. doi:10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005
- Ghellab, K., W.D.H. Roberts, P., Rmili, A., Retour, P., Lanet, J., & Tapio, R. (1999). Niveles adecuados de desarrollo de las carreteras. XXI Congreso Mundial de la Carretera. Kuala Lumpur: Association mondiale de la Route (AIPCR-PIARC).
- Gietl, R., Doneus, M., & Fera, M. (2007). Cost Distance Analysis in an Alpine Environment : Comparison of Different Cost Surface Modules. In *Layer of Perception. International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* (pp. 279–286). ISBN 978-3-7749-3556-3. Retrieved from http://www.academia.edu/398732/Cost_Distance_Analysis_in_an_Alpine_Environment_Comparison_of_Different_Cost_Surface_Modules
- Gómez Delgado, M., & Bosque Sendra, J. (2004). Sensitivity Analysis in Multicriteria Spatial Decisión-Making: A Review. *Human and Ecological Risk Assessment*, vol. 10, n° 6, pp. 1173–1188.
- GÓMEZ FAYRÉN, Josefa y LUJÁN MARTÍNEZ, Francisca. Estudio de la red de carreteras en la región de Murcia a través de sus dimensiones básicas. *Papeles de Geografía* n° 16. 1990.
- Gonzalo Orden, H. (2004). Los acondicionamientos de carreteras en los sistemas de gestión. Burgos: Universidad de burgos.
- GRASS, D. T. (08 de 11 de 2011). GRASS GIS 7.0.svn Reference Manual. Recuperado el 11 de 2012, de <http://grass.osgeo.org/grass70/manuals/>
- Graham, C. H. (2001). Factors Influencing Movement Patterns of Keel-Billed, 15(6), 1789–1798.
- Gutiérrez Puebla, J., & Gould, M. (2000). SIG. Sistemas de Información Geográfica. Síntesis SA.
- Gutiérrez Puebla, J. (2001). Location, economic potencial and daily accessibility: an analysis of the accessibility impact of the high speed line Madrid-Barcelona-French border. *Journal of Transport Geography* (9), 229–242.
- Gutiérrez, J., & Monzón, A. (1998). Accessibility, network efficiency, and transport infrastructure planning. *Environment and Planning A*, 30, pp. 1337–1350.
- Gutiérrez, J., Condeço, A., & Martín, J. C. (2007). Using accessibility indicators and GIS to assess and monetarize spatial spillovers of transport infrastructure. 47th Congress of European Regional Science Association. Paris.
- Gutiérrez, J., Condeço-Melhorado, A., & Martín, J. C. (2010). Using accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investment. *Journal of Transport Geography*, 18(1), 141–152. doi:10.1016/j.jtrangeo.2008.12.003
- Hagget, P. (1976). Análisis locacional en la geografía humana. Barcelona: Gustavo Gilli.
- Haggett, P. (1967). Network models in geography. En R. J. Chorley, & P. Haggett, *Integrated Models in Geography* (págs. 610–668). London: Methuen&Co.
- Halden, D., Mcguigan, D., Nisbet, A., & Mckinnon, A. (2000). ACCESSIBILITY : REVIEW OF MEASURING TECHNIQUES AND THEIR APPLICATION.
- Halleux, O. R. M., & Greene, W. D. (2001). Setting Analyst: A Practical Harvest Planning Technique.
- Hansen, W. G. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73–76. doi:10.1080/01944365908978307
- HERNÁNDEZ LUIS, José Ángel. Transporte y red viaria en la Isla de La Palma. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.1993.
- Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (2011). *An Introduction to Geographical Information Systems*. Pearson.
- Hinkelammert, F. (1996). El mapa del Emperador.
- Hudecek, T., & Zakova, Z. (2011). Unipolar anamorphosis and its use in accessibility analyses. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 322–326.
- Hung, T., & Yasuoka, Y. (2001). INTEGRATING SPATIAL STATISTICS AND GIS FOR REGIONAL STUDIES IN THAILAND. *Geocomputation*, (2). Retrieved from <http://www.geocomputation.org/2001/papers/tran.pdf>
- Husdal, J. (2000). How to make a straight line square. *Network Analysis in Raster GIS with time-dependent cost variables*. University of Leicester. Retrieved from www.husdal.com/wp-content/uploads/2008/07/thesis.pdf
- Huxhold, W. (1991). *An Introduction to Urban geographic Information Systems*.
- Ingram, D. R. (1971). The concept of accessibility: A search for an operational form. *Regional Studies*, 5(2), 101–107. doi:10.1080/09595237100185131
- IZQUIERDO, Rafael (editor). Transportes : un enfoque integral. Servicio de Publicaciones, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid 1994.
- Jobe, R. T., & White, P. S. (2009). A new cost-distance model for human accessibility and an evaluation of accessibility bias in permanent vegetation plots in Great Smoky Mountains National Park , USA. *Journal of Vegerarion Science*,



- 20, 1099-1109. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1654-1103.2009.01108.x/pdf>
- Johnson, S. (2008). El mapa fantasma. Ediciones Kantolla SL.
- Joly, O. (1999). Recent overview os spatial accesibility indicators applied in France. SDEC-France, Study Program on European Spatial Development. France: SPESD-France.
- Juliao, R. P. (1999). Measuring Accessibility Using GIS. In 4th International Conference on GeoComputation. Washington: Mary Washington College Fredericksburg.
- Kinsella-Shaw, J. M., Shaw, B., & Turvey, M. (1992). Perceiving 'Walk- on-able' Slopes. *Ecological Psychology*: v.4 , pp.223-239.
- Kramer, C., Pardillo, J., Rocci, S., Romana, M., Sánchez Blanco, V., & Val, M. (2003). *Ingeniería de Carreteras*. Madrid: McGraw-Hill.
- Kwan, M. (2010). Gender and Individual Access to Urban Opportunities : A Study Using Space - Time Measures, (May 2012), 37-41.
- Laboraty, T. a. (1978). *Terrain evaluation for highway engineering and transport planning*. Crowthorne, UK: DOE.
- Lage Reis-Correia, M. (2010). El empleo de software libre en el estudio de la morfología de los paisajes antiguos : el ejemplo del modelado coste-distancia aplicado a la investigación arqueológica . In IV Jornadas de SIG Libre.
- Lee, S., Ryu, J.-H., Min, K., & Won, J.-S. (2003). Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms* , 28 (12), 1361-1376.
- Liu, S., & Kam, T. S. (1999). Designing and Implementing Models of Accessibility Potential in a GIS Environment. Retrieved from <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc00/professional/papers/pap451/p451.htm>
- Liu, S., & Zhu, X. (2004a). Accessibility Analyst: an integrated GIS tool for accessibility analysis in urban transportation planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 105-124. doi:10.1068/b305
- Liu, S., & Zhu, X. (2004b). An Integrated GIS Approach to Accessibility Analysis. *Transactions in GIS*, 8(1), 45-62. doi:10.1111/j.1467-9671.2004.00167.x
- Longley, P. A., & Batty, M. (2003). *Advanced Spatial Analysis*. ESRI Press.
- López Suárez, E. (2007). ASSESSMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE PLANS: A STRATEGIC APPROACH INTEGRATING EFFICIENCY, COHESION AND ENVIRONMENTAL ASPECTS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.
- López, E., Monzón, A., Ortega, E., & Quintana, M. (2009). Assessment of Cross-Border Spillover Effects of National Transport Infrastructure Plans : An Accessibility Approach. *Transport Reviews : A Transnational Transdisciplinary Journal*, 29(4), 515-536. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01441640802627974>
- López Suárez, E. (n.d.). Measuring regional cohesion effects of large-scale transport infrastructure investments : an accessibility approach, 1-21.
- López Suarez, E., Mancebo Quintana, S., Ortega Pérez, E., & Monzón de Cáceres, A. (n.d.). El cálculo del valor europeo añadido mediante la utilización de indicadores de accesibilidad. aplicación a la evaluación de planes de infraestructuras de transporte.
- Loyola Gómez, C., & Albornoz del Valle, E. (2009). FLUJO, MOVILIDAD Y NIVELES DE ACCESIBILIDAD EN EL CENTRO DE CHILLAN AÑO 2007. PROPUESTA DE MEJORAMIENTO MEDIANTE SIG. *Urbano*, 12(19), 17-27.
- Makrí, M., & Folkesson, C. (1999). Accessibility Measures for Analyses of Land Use and Travelling with Geographical Information Systems. Retrieved from <http://www.lth.se/fileadmin/tft/dok/KFBkonf/4Makrifolkesson.pdf>
- Madelín, K., Vegter, T., Robichon, Y., Pichler, W., Csicsely-Tarpay, M., van Heys-traeten, G., y otros. (1999). *Gestión de Carreteras*. XXI Congreso Mundial de la Carretera. Kuala Lumpur: Association mundiales de la Route (AIPCR-PIARC).
- Madiedo Ruz, F., & Bosque Sendra, J. (2006). Una propuesta metodológica para la cuantificación de la visibilidad del territorio desde la red viaria. *Cuadernos geográficos de la Univ. de Granada* , nº 39, pp. 69-82.
- Marcos García, C., & Rodríguez Cebrián, M. (1999). Longitud de las carreteras y los caminos en España. Asociación Española de la Carretera.
- Martellato, D., & Nijkamp, P. (1998). The Concept of Accessibility Revisited. En A. Reggiani, *Accesibility, Trade and Locational Behaviour: An Introduction* (pág. 373). Aldershot: Ashgate Publishing Ltd.
- Martín, J. C., Gutiérrez, J., & Román, C. (2004). Data Envelopment Analysis (DEA) Index to Measure the Accessibility Impacts of New Infrastructure Investments: The Case of the High- speed Train Corridor Madrid-Barcelona-French Border. *Regional Studies*, 38(6), 697-712. doi:10.1080/003434042000240987
- Martínez Crespo, G. (2010). Diseño de una metodología basada en indicadores geoespaciales para la caracterización histórica, técnica y funcional de los trazados del Camino Francés en Galicia mediante el uso de tecnologías de la información geográfica. A Coruña: Universidade da Coruña.

- McHarg, I. (1969). *Design with nature* (Vol. (Proyectar). New York: Natural History Press, Garden City.
- McLoughlin, J. (1971). *Planificación urbana y regional. Un enfoque de sistemas*. Madrid, Instituto de Estudios de la Administración Local.
- Meyerson, a., Munagala, K., & Plotkin, S. (n.d.). Cost-distance: two metric network design. *Proceedings 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 624–630. doi:10.1109/SFCS.2000.892330
- Miller, H. J., & Bridwell, S. a. (2009). A Field-Based Theory for Time Geography. *Annals of the Association of American Geographers*, 99(1), 49–75. doi:10.1080/00045600802471049
- Montesinos Lajara, M., Gaspar, J., & Salinas, S. (2007). Panorama actual del ecosistema de software libre para SIG. In *I JORNADAS DE SIG LIBRE*. Retrieved from <http://www.sigte.udg.edu/jornadassiglibre2007/comun/1pdf/12.pdf>
- Monzón de Cáceres, A. (1988). Los indicadores de accesibilidad y su papel decisor en las inversiones en infraestructuras de transporte. *Aplicaciones en la comunidad de Madrid*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Moreno Jiménez, A., & Bosque Sendra, J. (2010). Los modelos de localización óptima como herramientas para la planificación territorial y urbana de instalaciones y equipamientos. *Ciudad y territorio. Estudios territoriales*, número 165-166, pp. 461-480.
- Morris, J., Dumble, P., & Wigan, M. (1978). accessibility indicators for transport planning. *transportation Research* (13A), 91-109.
- Nárdiz Ortiz, C. (1992). El territorio y los caminos en Galicia: planos históricos de la red viaria.
- Olaya, V. (2011). *Sistemas de Información Geográfica*. Retrieved from http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG
- Olaru, D., & Raicu, R. (2001). Accessibility measures of transport networks. Comparisons of neural networks and 'classical' approaches. *Proceedings of the 23rd Conference of the Australian Institutes of Transport Studies*. Monash University, Melbourne.
- Olvera, L. D., Plat, D., & Pochet, P. (2003). Transportation conditions and access to services in a context of urban sprawl and deregulation. The case of Dar es Salaam. *Transport Policy*, 10(4), 287–298. doi:10.1016/S0967-070X(03)00056-8
- Openshaw, S. (1996). Developing GIS-relevant zone-based spatial analysis methods. En P. Longley, & M. Batty, *Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment* (págs. 55-73). New York: John Wiley & Sons.
- Orro, A. (2004) "Las infraestructuras de transporte terrestre en Galicia. Configuración, demanda y planificación". En J.A. Díaz y R.C. Lois (eds.) "Las infraestructuras de comunicaciones y transportes en el desarrollo territorial de Galicia". Diputación Provincial de Pontevedra, Servicio de Publicaciones, Pontevedra, 2004. ISBN 84-8457-180-7.
- Ortega Pérez, E., Mancebo Quintana, S., & López Suarez, E. (n.d.). Análisis de la accesibilidad territorial debida a la alta velocidad en dos corredores ferroviarios en el marco del PEIT.
- Ortega Pérez, E., & Monzón de Cáceres, A. (2010). Análisis de la accesibilidad territorial por carretera y ferrocarril al sistema portuario en el marco del PEIT. In *IX Congreso de Ingeniería del Transporte*.
- Pablo, F., Muñoz, C., & Myro, R. (2003). Un análisis del efecto de la inversión en infraestructuras sobre la accesibilidad del territorio a la red viaria de alta capacidad. In *XXIX Reunión de Estudios Regionales*.
- Pardiñas Lamas, D., Penabab Gómez, M., & Varela García, F. A. (2011). Análisis de la calidad y la funcionalidad viaria empleadas en la elaboración de un plan de carreteras. In *II Congreso de Urbanismo y Ordenación del Territorio*.
- Pedro, R. (1999). ACCESSIBILITY AND GIS, 23–27.
- Peña Llopis, J. (2006). *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio*. Alicante: Editorial Club Universitario.
- Pérez, E. O., Quintana, S. M., & Suárez, E. L. (n.d.). Evaluación de efectos territoriales: Accesibilidad y medio ambiente debidos al PEIT en Castilla y León, (1), 1–9.
- Pingel, T. J. (2009). Modeling slope as a contributor to route selection in mountainous areas. Retrieved from http://www.ucgis.org/summer2009/studentpapers/pingel_thomas.pdf
- IZQUIERDO, Rafael (editor). *Transportes : un enfoque integral*. Servicio de Publicaciones, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid 1994.
- Ploeckl, F. (2008). Borders, Market Size and Urban Growth, the Case of Saxon Towns and the Zollverein in the 19th Century. *SSRN Electronic Journal*, (December). doi:10.2139/ssrn.1309773
- Potrykowski, M., & Taylor, Z. (1984). *Geografía del transporte*. Barcelona: Ariel.
- Potsiou, C., Muggenhunber, G., & Ioannidis, C. (2001). SHARING KNOWLEDGE IN SPATIAL INFORMATION MANAGEMENT. In *FIG International Conference on Spatial Information for Sustainable Development*, Nairobi, Kenya,. Re-



- trieved from <http://www.fig.net/pub/proceedings/nairobi/potsiou-mug-genhuber-ioannidis-TS1-2.pdf>
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., & Bosque Sendra, J. (2009). Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990-2000). *Scripta Nova: Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, N°. 13, 281-309.
- Plata-Rocha, W., Gómez-Delgado, M., & Bosque-Sendra, J. (2011). Simulating urban growth scenarios using GIS and multicriteria analysis techniques: A case study of the Madrid region, Spain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 38 (6), pp. 1012-1031.
- Prélaz-Droux, R., & Vuilleumier, S. (2002). Map of ecological networks for landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 58(2-4), 157-170. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204601002183#>
- RACIONERO, Luis. Sistema de ciudades y ordenación del territorio. Alianza Editorial. 1980.
- Ramírez, M. (2003). Cálculo de medidas de accesibilidad geográfica, temporal y económica generadas mediante sistemas de información geográfica. I Congreso de la Ciencia Cartográfica. Buenos Aires.
- Ray, N., & Ebener, S. (2008). AccessMod 3.0: computing geographic coverage and accessibility to health care services using anisotropic movement of patients. *International journal of health geographics*, 7, 63. doi:10.1186/1476-072X-7-63
- Rodríguez, M. J. (2001). LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA : UNA HERAMIENTA DE ANÁLISIS EN LOS ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA). In A. Aledo Tur & J. A. Domínguez Gómez (Eds.), *Sociología ambiental* (pp. 1-34). Grupo Editorial Universitario. Retrieved from <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/2725/10/cap10.pdf>
- Rodríguez Freire, M. (2005). Integración de la conectividad funcional en los procesos de ordenación territorial mediante técnicas SIG. Lugo: Universidad de Santiago de Compostela.
- Rodríguez Lázaro, F., Coronado Tordecillas, J., Ruiz Fernández, R., & Vega Muñoz, J. (2007). Análisis y valoración del patrimonio histórico de las carreteras españolas 1748/1936. Ministerio de Fomento. CEDEX-CEHOPU.
- Rodríguez Lloret, J., & Olivella González, R. (2011). Introducción a los SIG y geotelemática. En A. Pérez Navarro, *Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática* (pág. 347). Barcelona: UOC.
- Romo Peña, C., & Torres Cantero, J. C. (2011). Superficies de coste anisotrópicas. In *V Jornadas de SIG Libre*.
- Salado García, M. J. (2004). Localización de los equipamientos colectivos. accesibilidad y bienestar social. En J. Bosque Sendra, & A. Moreno Jiménez, *Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos* (págs. 17-51). Madrid: RA-MA.
- Samad, A. M., & all, e. (2011). Using neural nets to model the spatial distribution of seasonal homes. *Proceedings - 2011 IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications, CSPA 2011*, 325-331.
- Santé, I., García, A. M., Miranda, D., & Crecente, R. (2010). Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 96(2), 108-122. doi:10.1016/j.landurbplan.2010.03.001
- Santé-Riveira, I., Crecente-Maseda, R., & Miranda-Barrós, D. (2008). GIS-based planning support system for rural land-use allocation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(2), 257-273. doi:10.1016/j.compag.2008.03.007
- Santos Preciado, J. M. (2004). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: UNED.
- SARMIENTO ORDOSGOITIA, Iván; MUÑOZ, John y ÁNGEL SOTO, Carlos. Análisis de la accesibilidad vial en la región del occidente colombiano. IV Congreso de Ingeniería del Transporte. Valencia 2000.
- Scharenbroich, C. (2006). Classifying Access on Whitewater Wildlife Management Area Callahan Unit using GIS. Winona. Retrieved from <http://www.gis.smumn.edu/gradprojects/scharenbroichc.pdf>
- Schnetter M., B. (2004). Flujos de Compra en el Area Comercial de Temuco, Chile. *Revista austral de ciencias sociales* no 8, 133-144. doi:ISSN 0718-1795 versión on-line
- Schürmann, C., Spiekermann, K., & Wegener, M. (1997). Accessibility Indicators: Model and Report. (U. D. SASI Deliverable D5. Institut für Raumplanung, Ed.) Obtenido de <http://irpud.raumplanung.uni-dortmund.de/irpud/pro/sasi/sasid5.htm>
- Serrano Cambroner, M. M. (2001). *INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE Y DESARROLLO URBANO: APROXIMACIÓN METODOLÓGICA POR MEDIO DE TELEDETECCIÓN*. Universidad Complutense de Madrid.
- Skov-Petersen, H. (2001). Estimation of distance-decay parameters - GIS-based indicators of recreational accessibility.

- Shellito, B. A., & Pijanowski, B. C. (2003). Using neural nets to model the spatial distribution of seasonal homes. *Cartography and Geographic Information Science*, 30 (3), 281-290.
- Soria y Puig, A. (1993). *El Camino a Santiago. Vías, estaciones y obras*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transporte.
- Stefanakis, E., & Kavouras, M. (1995). On the Determination of the Optimum Path in Space. In *Proceedings of the European Conference on Spatial Information Theory, COSIT 95*. Retrieved from <http://www.ntua.gr/ontogeo/publications/cosit1995.pdf>
- Stephen Rogers, A. (2004). *The Influence of Landscape Position on Coastal Marsh Loss*. University of Maryland.
- Subero Munilla, J. M. (2009). MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA EFICACIA ESPACIAL DE LAS REDES DE TRANSPORTE COLECTIVO DE INFRAESTRUCTURA FIJA, ENSAYO DE INDICADORES DE OFERTA. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Sun, J., Walters, M., Svensson, N., & Lloyd, D. (1996). The influence of surface slope on human gait characteristics: A study of urban pedestrians walking on an inclined surface. *Ergonomics*, 39-4 , 677-692.
- Theobald, D. M., Stevens, D. L., White, D., Urguhart, N. S., Olsen, A., & Norman, J. B. (2007). Using GIS to generate spatially balanced random survey designs for natural resource applications. *Environmental Management* , 40 (1), 134-146.
- Thrift, N. (1977). AN INTRODUCTION TO TIME-GEOGRAPHY. *CATMOG- Concepts And Techniques in Modern Geography*, 13(ISSN 0306 - 6142). Retrieved from <http://www.qmrg.org.uk/files/2008/11/13-time-geography.pdf>
- Tobler, W. (1993). *THREE PRESENTATIONS ON GEOGRAPHICAL ANALYSIS AND MODELING*. Santa Barbara: NATIONAL CENTER FOR GEOGRAPHIC INFORMATION AND ANALYSIS - University of California.
- Tomlin, C. D. (1990). *Geographic information system and cartographic modelling*. Prentice-Hall.
- Travis, M. R., Elsner, G. H., Iverson, W. D., & Johnson, C. G. (1975). *VIEWIT: computation of seen areas, slope, and aspect for land-use planning*. Berkeley, CA: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture: 70 p.: Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-11.
- Travis, M. R., Elsner, G. H., Iverson, W. D., & Johnson, C. G. (1975). *VIEWIT: computation of seen areas, slope, and aspect for land-use planning*. Berkeley, CA: Pacific Southwest Research Station, Forest Serv: Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-11.
- TURRÓ CALVET, Mateu. La accesibilidad, criterio básico para el desarrollo de un sistema de transportes eficaz, sostenible y cohesiva. *Revista OP* nº 35.1996.
- VALENZUELA MONTES, Luis Miguel. El marco territorial de las infraestructuras de transporte: accesibilidad, planificación y efectos. CEMCI. 1998.
- Vallès, R. V., Bollas, A. M., & Pérez, A. (2010). Modelo anisotrópico de cálculo de rutas de coste mínimo con gvSIG y SEXTANTE. In *IV Jornadas de SIG Libre*.
- Van Herzele, A., & Wiedemann, T. (2003). A monitoring tool for the provision of accessible and attractive urban green spaces. *Landscape and Urban Planning*, 63(2), 109-126. doi:10.1016/S0169-2046(02)00192-5
- Varela García, F. A. (2000). Análisis de las comunicaciones comarcales a través de la red viaria de los municipios de la provincia de La Coruña. A Coruña: Universidade da Coruña.
- Varela García, F. A., Hernández Ibáñez, L. A., Taibo Pena, J., Seoane, A., López, R., & Jaspe, A. (2005). GESTIÓN DEL TRÁFICO MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE UN GIS CON UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN REALISTA EN 3D SOBRE EL TERRITORIO. In *V Congreso de ITS*. Málaga.
- Varela García, F. A. (2007). Infraestructuras viarias. En D. d. Coruña, *Plan Estratégico de la provincia de A Coruña/2007-2013* (pág. 510). A Coruña.
- Varela García, F. A., Varela García, J. I., Lorenzo Tarrío, S., & Borobio Sanchiz, M. (2008). Extracción y aprovechamiento de la información geográfica puntual de un catálogo visual de carreteras. In *II Jornadas de SIG Libre*. Girona: Universitat de Girona.
- Varela García, F. A., Borobio Sanchiz, M., Martínez Crespo, G., & Ocampo Souto, J. (2010). Tecnologías de Información Geográfica en el análisis Territorial de los Caminos de Santiago en Galicia. In *XIV Congreso Nacional de TIG*. Sevilla: Asociación de Geógrafos Españoles.
- Varela García, F. A., Martínez Crespo, G., Ocampo Couto, J., Jiménez Bernal, J. M., & Varela García, J. I. (2010). Análisis histórico y funcional del itinerario del Camino Francés a su paso por Galicia desde una metodología basada en indicadores geoespaciales. In *I Congreso Internacional de Carreteras, Cultura y Territorio*. A Coruña: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Varela García, F. A., Martínez Crespo, G., & Jiménez Bernal, J. M. (2011). Chemin de Saint-Jacques de Compostelle en Galice: caractérisation technique et historique moyennant la création d'indicateurs géospatiaux. In *25th International Cartographic Conference*. Paris: International Cartographic Association.



- Warntz, W. (1965). A note on surfaces and paths with applications to geographic problems. Disc. paper 6, Michigan Inter-Univ. Comm. Math. Geog., Ann Arbor, Michigan and Warntz (above) .
- Weydahl, D., Eldhuset, K., Dick, O., & Langmoen, B. (2012). GEOREFERENCING, FEATURE EXTRACTION AND CHANGE DETECTION IN HARBOUR AND CITY AREAS USING HIGH-RESOLUTION SATELITE SAR IMAGES ACQUIRED FROM MULTIPLE SENSORS. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium proceedings, 7452-7455.
- Wikipedia. (s.f.). Recuperado el 30 de 12 de 2011, de <http://es.wikipedia.org/wiki/Geom%C3%A1tica>
- XUNTA DE GALICIA. CONSELLERÍA DE ORDENACIÓN DO TERRITORIO E OBRAS PÚBLICAS. DIRECCIÓN XERAL DE OBRAS PÚBLICAS. Plan de estradas de Galicia. 1991.
- Yu, C., Lee, J., & Munro-Stasiuk, M. J. (2003). Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning. International Journal of Geographical Information Science, 17(4), 361-376. doi:10.1080/1365881031000072645
- Zhang, C., Li, M., Li, F., Shen, C., & Chen, J. (2010). A Study on Spatial Accessibility Based on Urban Metro Traffic – A case study of Xinjiekou in Nanjing. In Geoinformatics, 2010 18th International Conference on. doi:10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567763
- Wikipedia, t. f. (2012). Naismith's rule. Recuperado el 11 de 2012, de http://en.wikipedia.org/wiki/Naismith%27s_rule



9. ANEJO 1.

Datos de la red viaria en todos los municipios de la provincia de A Coruña según la EIEL de 2005

Municipio	ES	CA	PR	MU	OT	Total general
Abegondo	19,8	22,7	25,0	206,6	0,0	274,2
Ames	1,6	25,9	25,9	155,2	0,0	208,6
Aranga	28,7	14,2	16,4	232,0	0,6	291,9
Ares	0,0	4,2	9,3	52,2	0,0	65,7
Arteixo	4,1	57,8	56,8	166,1	0,0	284,8
Arzúa	16,4	22,1	20,2	368,2	2,1	429,0
A Baña	0,0	19,7	9,8	238,3	0,0	267,8
Bergondo	13,9	17,5	27,9	100,6	0,0	159,9
Betanzos	22,2	9,7	14,4	73,7	0,0	120,1
Boimorto	0,0	17,3	28,2	201,5	0,0	247,0
Boiro	0,0	20,1	32,4	197,8	0,0	250,3
Boqueixón	4,0	21,0	6,6	177,8	0,0	209,4
Brión	0,0	16,7	16,4	150,6	0,0	183,6
Cabana de Bergantiños	0,0	30,5	26,1	138,2	0,0	194,8
Cabanas	12,1	12,1	6,6	55,9	0,0	86,8
Camariñas	0,0	10,1	8,5	132,2	0,0	150,8
Cambre	19,1	18,3	21,2	111,3	0,0	169,9
A Capela	0,0	17,5	0,0	95,8	0,0	113,3
Carballo	0,0	36,0	60,3	354,6	0,0	450,8
Carnota	0,0	27,0	0,0	107,5	0,0	134,4
Carral	11,8	5,3	32,1	112,7	0,0	161,9
Cedeira	0,0	20,1	29,2	153,9	0,1	203,3
Cee	0,0	18,1	8,6	86,0	0,0	112,6
Cerceda	0,0	28,7	26,3	179,1	0,0	234,1
Cerdido	0,0	18,5	7,2	142,5	0,0	168,2
Cesuras	0,0	6,9	18,1	182,1	0,0	207,0
Coirós	21,4	0,0	16,1	81,5	0,0	119,0
Corcubión	0,0	4,7	5,5	15,1	0,0	25,3
Coristanco	0,0	22,6	38,1	171,0	0,0	231,7
A Coruña	18,6	35,9	17,6	79,5	0,0	151,5
Culleredo	15,7	31,8	29,4	130,9	0,0	207,8
Curtis	17,0	19,0	17,0	267,1	0,0	320,2

Municipio	ES	CA	PR	MU	OT	Total general
Dodro	0,0	21,7	5,8	59,6	0,0	87,1
Dumbría	0,0	15,4	26,8	185,9	0,0	228,1
Fene	9,3	9,5	18,2	88,3	0,0	125,3
Ferrol	12,9	6,2	38,0	165,7	0,0	222,8
Fisterra	0,0	7,1	0,0	70,6	0,0	77,6
Frades	4,5	5,1	16,2	143,4	0,0	169,2
Irixoa	0,0	7,0	21,6	151,9	0,0	180,5
Laxe	0,0	13,8	3,6	86,0	0,0	103,3
A Laracha	0,0	19,0	40,1	255,4	0,0	314,5
Lousame	0,0	15,9	32,5	176,1	0,0	224,6
Malpica de Bergantiños	0,0	13,4	14,9	134,5	0,0	162,8
Mañón	0,0	11,8	27,7	124,4	0,0	163,8
Mazaricos	0,0	21,6	26,0	268,6	0,0	316,2
Melide	11,5	12,5	15,9	252,7	0,0	292,6
Mesía	10,9	20,1	8,7	251,6	0,1	291,5
Miño	11,7	8,2	19,9	88,6	0,0	128,4
Moeche	0,0	9,6	25,5	117,4	0,0	152,5
Monfero	0,0	15,5	48,2	321,8	0,0	385,5
Mugardos	0,0	16,2	4,8	39,8	0,0	60,9
Muxía	0,0	13,5	30,7	265,5	0,0	309,7
Muros	0,0	30,2	21,1	77,9	0,0	129,2
Narón	2,9	37,4	22,2	142,2	0,0	204,6
Neda	1,6	16,2	4,0	71,7	0,0	93,5
Negreira	0,0	7,4	39,7	200,8	0,0	247,9
Noia	0,0	21,7	20,4	54,6	0,0	96,7
Oleiros	8,1	45,5	24,7	117,1	0,0	195,6
Ordes	29,9	19,0	12,6	476,7	0,0	538,2
Oroso	14,6	4,8	17,2	215,3	0,0	251,8
Ortigueira	0,0	44,3	78,2	316,9	2,9	442,2
Outes	0,0	16,5	52,8	169,9	0,0	239,2
Oza dos Ríos	2,6	15,2	25,2	176,4	0,0	219,5
Paderne	6,6	0,5	17,1	96,2	0,0	120,4

Municipio	ES	CA	PR	MU	OT	Total general
Padrón	21,5	16,6	5,5	137,9	0,0	181,5
O Pino	37,0	0,0	15,3	276,5	0,0	328,7
A Pobra do Caramiñal	0,0	17,7	14,4	65,3	0,0	97,4
Ponteceso	0,0	26,1	29,4	162,3	0,0	217,8
Pontedeume	10,2	9,7	24,6	62,9	0,0	107,4
As Pontes de García Rodríguez	0,0	44,2	52,3	317,1	0,0	413,6
Porto do Son	0,0	24,2	17,1	203,2	0,0	244,4
Rianxo	0,0	21,4	21,8	135,2	0,0	178,4
Ribeira	0,0	26,1	42,0	101,9	0,0	170,0
Rois	0,7	22,2	19,0	142,9	0,0	184,8
Sada	1,7	18,2	30,0	68,7	0,0	118,6
San Sadurniño	0,0	29,4	19,9	259,1	0,0	308,4
Santa Comba	0,0	37,1	27,0	476,4	0,0	540,5
Santiago de Compostela	70,8	31,0	29,0	513,8	0,0	644,5
Santiso	0,0	3,6	6,5	167,7	0,0	177,8
Sobrado	0,0	22,2	12,9	203,8	0,0	239,0
As Somozas	0,0	12,1	19,2	221,0	0,0	252,3
Teo	14,1	23,7	23,1	217,8	0,0	278,7
Toques	0,0	0,0	17,4	153,7	0,0	171,1
Tordoia	0,0	8,5	27,3	232,6	0,0	268,4
Touro	0,0	25,6	15,5	261,5	0,0	302,5
Trazo	0,0	0,0	25,1	260,6	0,0	285,7
Valdoviño	0,0	25,8	28,9	255,2	0,0	309,9
Val do Dubra	0,0	0,5	36,9	183,1	0,0	220,5
Vedra	10,2	13,7	22,0	104,7	0,0	150,6
Vilasantar	1,9	10,8	11,7	151,9	0,0	176,3
Vilarmador	0,0	9,3	16,9	84,9	0,0	111,1
Vimianzo	0,0	42,8	14,8	332,4	0,0	390,0
Zas	0,0	27,5	13,2	244,6	0,0	285,2
Cariño	0,0	0,0	26,0	81,8	0,0	107,8
Total general	521,5	1.703,8	2.082,1	16.361,3	5,8	20.674,5

10. ANEJO 2.

Datos de la red viaria en las provincias españolas según la EIEL de 2005

Estos datos corresponden únicamente a los municipios de menos de 50.000 habitantes.

PROVINCIA	ES	CA	PR	MU	OT	Total
Albacete	504,4	1.574,8	1.499,6	11,7	60,5	3.651,1
Alicante/Alacant	364,2	802,5	855,5	29,2	1,6	2.053,0
Almería	243,6	742,4	1.227,3	1.366,9	50,3	3.630,5
Asturias	675,2	3.751,8	0,0	4.811,3	6,4	9.244,7
Ávila	361,9	954,2	1.151,5	229,2	20,2	2.717,0
Badajoz	736,0	1.936,0	1.756,5	20,8	0,0	4.449,3
Balears (Illes)	5,7	710,4	1.177,1	365,4	5,1	2.263,7
Barcelona	0,0	0,0	5,5	0,0	0,0	5,5
Burgos	818,5	1.902,2	2.244,5	1.020,8	0,0	5.986,0
Cáceres	523,2	1.517,1	1.752,6	78,8	1.343,3	5.214,9
Cádiz	153,1	1.109,2	147,1	12,8	3,5	1.425,7
Cantabria	504,3	1.976,8	0,0	1.301,4	3,0	3.785,5
Castellón/Castelló	361,7	1.007,0	777,1	156,7	0,0	2.302,5
Ciudad Real	648,0	1.473,1	1.828,7	72,0	15,5	4.037,3
Córdoba	535,7	1.434,7	2.129,4	0,0	0,0	4.099,8
Coruña (A) EIEL 2005	419,2	1630,8	1997,6	15602,4	5,4	19.655,3
Cuenca	770,9	1.582,1	1.158,2	53,1	0,0	3.564,3
Granada	64,8	2.039,2	1.176,4	227,1	345,4	3.852,9
Guadalajara	383,0	1.395,2	1.566,2	386,5	2,4	3.733,2
Huelva	413,1	919,3	764,2	100,2	64,1	2.260,9
Huesca	851,6	1.966,9	621,1	1.735,4	28,7	5.203,7
Jaén	706,7	1.797,1	1.640,1	182,0	86,1	4.412,0
León	709,3	1.718,1	4.210,3	322,1	57,8	7.017,6
Lleida	471,1	1.337,2	823,7	3.634,2	0,0	6.266,1
Lugo	830,4	1.490,2	4.446,6	7.373,2	6,5	14.146,9
Madrid	257,9	2.236,8	0,0	0,0	0,0	2.494,7

PROVINCIA	ES	CA	PR	MU	OT	Total
Málaga	274,0	553,1	1.226,0	221,4	2,4	2.276,9
Murcia	370,0	2.405,6	0,0	467,0	10,0	3.252,6
Ourense	453,4	1.034,5	1.806,2	3.978,3	0,0	7.272,4
Palencia	278,3	1.500,0	1.013,9	6,6	0,0	2.798,8
Palmas (Las)	0,0	334,4	1.475,2	275,6	0,0	2.085,2
Pontevedra	427,0	993,9	1.743,1	1.641,4	0,0	4.805,4
Rioja (La)	366,4	1.398,5	0,0	3,4	0,0	1.768,3
Salamanca	267,3	1.157,6	1.857,2	456,3	0,0	3.738,4
Santa Cruz de Tenerife	0,0	443,4	1.295,2	157,2	7,3	1.903,1
Segovia	292,3	731,8	1.176,9	356,8	3,5	2.561,3
Sevilla	272,8	1.529,1	1.751,4	0,0	211,2	3.764,5
Soria	474,7	885,3	1.866,7	9,2	0,0	3.235,9
Tarragona	436,1	1.003,2	955,4	3.459,2	20,0	5.873,9
Teruel	602,4	1.486,2	1.106,7	645,7	165,7	4.006,7
Toledo	580,9	1.804,3	924,2	205,0	33,0	3.547,4
Valencia	685,5	698,9	1.850,2	12,6	0,0	3.247,2
Valladolid	563,2	1.050,5	1.502,7	0,0	0,0	3.116,4
Zamora	536,0	1.055,0	1.632,0	117,0	0,0	3.340,0
Zaragoza	901,4	1.953,3	1.064,3	862,5	33,4	4.814,9
TOTAL	20.095,2	61.023,4	59.204,2	51.968,2	2.592,3	194.883,3
MEDIA	446,6	1.356,1	1.315,6	1.154,8	57,6	4.330,7

11. ANEJO 3.

Resultados de tiempos a los puntos aleatorios de control del entorno de la ciudad de Vigo mediante el análisis de red y los métodos CDVAC y CDC con resoluciones de 25 y 100 metros

CODIGO_PUNTO_CONTROL	TIEMPO	T_CDVAC25	T_CDVAC100	T_CDC100	T_CDC25
0	237	211	156	144	211
1	223	201	146	134	201
2	436	428	391	383	428
3	307	235	181	169	235
4	459	379	306	294	379
5	342	235	162	161	235
6	706	541	435	510	635
7	205	145	99	87	145
8	356	344	162	414	403
9	358	251	198	186	251
10	493	401	315	347	435
11	422	343	246	234	343
12	277	193	140	128	193
13	492	445	332	341	470
14	648	420	359	429	547
15	798	553	484	639	702
16	593	447	367	376	459
17	569	401	298	285	401
18	737	441	379	366	441
19	556	283	245	233	283
20	441	352	261	340	559
21	325	224	181	169	224
22	356	238	393	156	238
23	528	384	327	311	384
24	536	522	403	389	522
25	777	597	497	526	660
26	621	364	295	282	364
27	620	549	415	402	562
28	738	479	402	485	561

CODIGO_PUNTO_CONTROL	TIEMPO	T_CDVAC25	T_CDVAC100	T_CDC100	T_CDC25
29	903	681	608	765	830
30	763	588	520	607	721
31	713	597	469	455	597
32	750	515	354	341	515
33	626	394	328	408	457
34	716	478	388	512	620
35	637	573	374	364	587
36	449	736	255	243	736
37	995	832	615	598	846
38	954	1.039	608	951	1102
39	813	620	520	518	620
40	858	544	461	448	544
41	865	660	549	546	660
42	891	643	483	501	725
43	883	630	557	603	796
44	913	666	576	764	846
45	1.127	897	764	922	1046
46	1.349	1.165	801	974	1314
47	1.366	1.116	915	1.087	1264
48	1.176	932	698	796	1099
49	954	901	901	604	901
50	887	558	445	465	619
51	904	791	662	659	791
52	924	721	610	605	721
53	1.026	865	685	678	865
54	1.043	929	731	706	929
55	767	662	585	580	676
56	1.064	1.017	830	824	1030
57	1.095	956	661	829	970

CODIGO_PUNTO_CONTROL	TIEMPO	T_CDVAC25	T_CDVAC100	T_CDC100	T_CDC25
58	1.291	1.136	929	900	1141
59	1.786	1.736	1.161	1.154	1736
60	1.449	1.156	817	810	1156
61	1.031	820	689	683	820
62	951	571	491	479	571
63	1.058	717	629	668	789
64	1.035	884	731	740	884
65	1.818	1.233	1.013	1.020	1347
66	1.250	967	779	869	1080
67	1.544	1.302	1.026	1.166	1419
68	1.095	727	837	760	913
69	1.157	1.113	885	875	1127
70	1.527	1.358	1.140	1.108	1358
71	1.549	1.462	1.168	1.150	1462
72	2.127	2.597	1.544	1.534	2597
73	1.600	2.048	1.398	1.391	2048
74	1.147	1.031	920	904	1032
75	1.121	764	653	657	767
76	1.179	934	826	839	945
77	934	755	659	668	755
78	1.498	1.133	961	966	1133
79	1.873	1.557	1.330	1.418	1557
80	1.614	1.535	1.294	1.277	1549
81	1.660	1.592	1.359	1.337	1606
82	2.019	1.810	1.540	1.552	1817
83	1.923	1.345	1.187	1.259	1414
84	1.239	927	915	948	1266
85	1.166	693	620	608	693
86	1.024	678	603	600	685



CODIGO_PUNTO_CONTROL	TIEMPO	T_CDVAC25	T_CDVAC100	T_CDC100	T_CDC25
87	1.458	1.134	879	865	1147
88	1.612	1.149	964	1.058	1231
89	2.122	1.526	1.318	1.384	1668
90	1.896	2.013	1.634	1.608	2026
91	1.728	1.621	1.472	1.448	1635
92	2.216	2.542	2.272	2.236	2555
93	2.441	2.005	1.643	1.752	2147
94	1.909	1.422	1.176	1.294	1556
95	1.675	1.080	958	1.046	1247
96	1.723	1.030	933	1.102	1214
97	1.692	1.229	1.115	1.101	1235
98	1.576	1.248	1.127	1.136	1248
TIEMPO TOTAL	103.280	84.892	69.123	71.643	89.474
PORCENTAJE	100%	82,2%	66,9%	69,4%	86,6%



12. ANEJO 4.

Resultados de tiempos a las capitales de municipio del ámbito geográfico de análisis mediante el análisis de red y los métodos CDVAC y CDC con resoluciones de 25 y 100 metros.

CAPITAL MUNICIPIO	TIEMPO_RED	T_CDVAC25	T_CDC25	T_CDVAC100	T_CDC100
Vigo	0	0	0	0	0
Reguengo	881	536	538	456	448
Redondela	887	750	764	667	662
O Porriño	1.165	729	729	611	597
Gondomar	1.354	1.110	1.160	1.000	1.014
Tui	1.450	1.191	1.199	1.099	1.091
Vilameín	1.507	1.230	1.230	1.108	1.117
Pazos	1.549	1.393	1.407	1.244	1.226
A Esfarrapada	1.627	1.343	1.343	1.213	1.194
Baiona	1.698	1.413	1.432	1.295	1.350
Ponteareas	1.706	1.251	1.269	1.120	1.167
O Seixo	2.055	1.830	1.905	1.745	1.773
O Castelo	2.143	1.790	1.790	1.662	1.638
A Igrexa	2.260	2.152	2.166	1.944	1.909
Mondariz-Balneario	2.348	1.812	1.906	1.619	1.695
As Neves	2.353	1.912	1.924	1.760	1.750
Mondariz	2.440	1.972	1.991	1.798	1.787
A Cañiza	2.449	1.896	1.904	1.828	1.820
Santiago de Covelo	2.556	2.155	2.155	2.006	1.979
O Arrabal	2.859	2.650	2.650	2.192	2.193
O Calvario	3.078	2.874	2.948	2.658	2.663
O Pazo	3.089	2.574	2.630	2.360	2.405
Crecente	3.207	2.627	2.627	2.441	2.414
A Guarda	3.500	3.307	3.382	3.039	3.016
TIEMPO TOTAL	48.161	40.497	41.049	36.865	36.908
PORCENTAJE	100%	84,10%	85,20%	76,50%	76,60%

CAPITAL MUNICIPIO	P_CDVAC25	P_CDC25	VAR_25	P_CDVAC100	P_CDC100	VAR_100
Vigo						
Reguengo	60,8%	61,1%	0,2%	51,8%	50,9%	-0,9%
Redondela	84,6%	86,1%	1,6%	75,2%	74,6%	-0,6%
O Porriño	62,6%	62,6%	0,0%	52,4%	51,2%	-1,2%
Gondomar	82,0%	85,7%	3,7%	73,9%	74,9%	1,0%
Tui	82,1%	82,7%	0,6%	75,8%	75,2%	-0,6%
Vilameín	81,6%	81,6%	0,0%	73,5%	74,1%	0,6%
Pazos	89,9%	90,8%	0,9%	80,3%	79,1%	-1,2%
A Esfarrapada	82,5%	82,5%	0,0%	74,6%	73,4%	-1,2%
Baiona	83,2%	84,3%	1,1%	76,3%	79,5%	3,2%
Ponteareas	73,3%	74,4%	1,1%	65,7%	68,4%	2,8%
O Seixo	89,1%	92,7%	3,6%	84,9%	86,3%	1,4%
O Castelo	83,5%	83,5%	0,0%	77,6%	76,4%	-1,1%
A Igrexa	95,2%	95,8%	0,6%	86,0%	84,5%	-1,5%
Mondariz-Balneario	77,2%	81,2%	4,0%	69,0%	72,2%	3,2%
As Neves	81,3%	81,8%	0,5%	74,8%	74,4%	-0,4%
Mondariz	80,8%	81,6%	0,8%	73,7%	73,2%	-0,5%
A Cañiza	77,4%	77,7%	0,3%	74,6%	74,3%	-0,3%
Santiago de Covelo	84,3%	84,3%	0,0%	78,5%	77,4%	-1,1%
O Arrabal	92,7%	92,7%	0,0%	76,7%	76,7%	0,0%
O Calvario	93,4%	95,8%	2,4%	86,4%	86,5%	0,2%
O Pazo	83,3%	85,1%	1,8%	76,4%	77,9%	1,5%
Crecente	81,9%	81,9%	0,0%	76,1%	75,3%	-0,8%
A Guarda	94,5%	96,6%	2,1%	86,8%	86,2%	-0,7%
PORCENTAJE	82,5%	83,6%	1,1%	74,8%	74,9%	0,1%

13. ANEJO 5.

Ejemplo de cálculo de costes de desplazamiento mediante el modelo de coste distancia condicionado

Con la finalidad de clarificar los pasos necesarios en los cálculos previstos en el algoritmo presentaremos un ejemplo sobre la operatividad del mismo. Puesto que las capacidades del algoritmo permiten su uso considerando varios tipos de infraestructuras o modos de transporte, y aunque este proyecto versa exclusivamente sobre la accesibilidad territorial mediante las infraestructuras viarias, emplearemos también en este ejemplo el ferrocarril como zona de desplazamiento específica, para verificar el potencial de este método.

Dispondremos para esta situación descriptiva de una retícula sencilla de 6x6 celdas. Para simplificar los cálculos se supone que el tamaño de celda es 1. La Superficie de Costes Simples de la Figura 232 recoge los valores que representan la fricción al desplazamiento genérico, o simple, de cada una de las celdas. Los valores más pequeños indican que se precisa emplear un menor tiempo en ser atravesadas, y por tanto tendrán una velocidad de desplazamiento mayor en ellas que en las celdas con valores superiores. La celda “Vacía” significa que por ella está restringido el desplazamiento por alguna razón, por lo tanto será una celda que no participará en los cálculos y operaciones posteriores.

2	3	4	4	3	5
4	6	2	6	4	4
5	5	7	8	3	6
3	4	5	vacía	3	8
4	7	2	1	2	4
3	2	5	6	3	6

Figura 232. Superficie de Costes Simple de la región ejemplo (SCS).

Cada tipo de zona de desplazamiento en este ejemplo se representa con un color diferente, que identificará las diferentes zonas de desplazamiento consideradas (Figura 233):

- Terreno. Valor 1
- Carretera convencional. Valor 2
- Vía de Alta Capacidad (VAC). Valor 3

- Enlace VAC. Valor 4.
- Vía férrea. Valor 5
- Estación de ferrocarril. Valor 6

2	1	5	1	2	1
2	1	6	1	2	1
2	1	5	1	2	1
2	1	5	vacía	2	1
4	4	3	3	2	3
4	4	5	1	2	1

Figura 233. Distribución de las zonas de desplazamiento del ejemplo.

Las zonas con desplazamiento condicionado corresponden a la autopista o vía de alta capacidad (zona 3) y a la vía férrea (zona 5), que presentan por tanto una superficie de costes condicionados propia como vemos en Figura 234 y Figura 235.

2	1	1	1	1	1

Figura 234. Superficie de Coste Condicionado para la Vía de Alta Capacidad (SCC_{VAC}).

		1			
		1			
		1			
		1			
		1			
		1			

Figura 235. Superficie de Coste Condicionado para la Vía férrea (SCC_f).

Podemos comprobar que para este tipo de zonas de desplazamiento condicionado, no es necesario identificarlas completamente en la matriz de distribución de zonas. Debido a la interacción entre los elementos del territorio considerados, puede ser que unos se superpongan sobre otros, sin que ello signifique que se produzca una interrupción en los trazados de las infraestructuras que representan esos movimientos condicionados.

Concretamente en este ejemplo, podemos apreciar como el ferrocarril y la autopista poseen una celda coincidente, la correspondiente a la fila 5 y columna 3, numerando de arriba a abajo y de izquierda a derecha. Asimismo, la autopista presenta coincidencias con el enlace (zona 4) en las celdas de la fila 5 y las columnas 1 y 2. La autopista también coincide en la fila 5, columna 5, con una carretera convencional (zona 2). Sin embargo en todos estos casos, ni la autopista, ni la línea de ferrocarril sufren corte alguno en el desplazamiento que se calculará sobre ellos posteriormente mediante el Coste Acumulado Condicional correspondiente. Por ello en las SCC correspondientes, se representan los valores de los costes de desplazamiento asociados a cada una de esas infraestructuras durante todo el recorrido de las mismas en esta región ejemplo.

La zona de desplazamiento de la vía de alta capacidad, presenta como Nodo a la zona 4, “Enlace VAC”, mientras que la zona 5, “Vía férrea” tiene como Nodo a la zona 6, “Estación de ferrocarril”.

La Matriz de Condiciones de Desplazamiento de la Figura 236 nos indica para cada tipo de zona origen y zona destino, si se permite el desplazamiento (TRUE) o se impide (FALSE) para el cálculo del Coste Acumulado Simple (CAS). Se restringe cualquier movimiento de la autopista con el resto de elementos territoriales considerados para calcular CAS. Esto no implica que en esta zona no se vaya a calcular el Coste Acumulado Condicionado (CAC) que corresponda, pues la Matriz de Condiciones de Desplazamiento sólo afecta al CAS. También se impide la comunicación entre el terreno (zona 1) y el enlace a la vía de alta capacidad (zona 4). En este ejemplo, el resto de comunicaciones se consideran factibles, y por tanto se permiten.



o\o	1	2	3	4	5	6
1	true	true	false	false	true	true
2	true	true	false	true	true	true
3	false	false	false	false	false	false
4	false	true	false	true	true	true
5	true	true	false	true	true	true
6	true	true	false	true	true	true

Figura 236. Matriz de Condiciones de Desplazamiento para las zonas del ejemplo.

La correcta definición de la distribución de las zonas de desplazamiento y de esta matriz que establece las restricciones en los desplazamientos entre las zonas será crucial para el funcionamiento posterior del algoritmo. La consideración de un supuesto lo más real posible para la modelización de las condiciones de accesibilidad, tendrá en este punto el elemento fundamental del proceso.

Para que el cálculo posterior tenga sentido, al menos las zonas de desplazamiento condicionado y las zonas consideradas como nodos de las mismas, deben tener la posibilidad de comunicarse entre ellas.

Además para ejecutar el algoritmo necesitamos además disponer de las celdas fuentes que generen los desplazamientos por toda la región considerada, y que se indican como zona 0 en la retícula de celdas mostrada (Figura 237).

	0	0			
		0			

Figura 237. Definición de celdas fuente de desplazamientos en la región ejemplo.

Obsérvese que todas las retículas que hacen referencia a la región ejemplo disponen del mismo número de celdas, independientemente si tienen valor o no. Aunque podría plantearse de otra manera, el algoritmo implementado en este proyecto de investigación para obtener el Coste Distancia Condicionado, precisa de datos geográficos de entrada en formato ráster de la misma resolución y con el mismo número de celdas.

Durante el cálculo, el algoritmo comienza considerando las celdas fuente como origen de los primeros desplazamientos hacia las celdas vecinas. Se admite que el CAS existente inicialmente es nulo, y por tanto en el primer desplazamiento desde cada una de las celdas fuente hacia las limítrofes, sólo se tendrá en cuenta el coste del desplazamiento a realizar, empleando la Ecuación 30, ya vista:

$$CAS_o = CAS_o + d \cdot (CS_o + CS_o)$$

En estos primeros movimientos CAS_o es cero, por lo que sólo se atenderá al segundo sumando. El tamaño de celda es 1 por lo que el factor “d” que representa la distancia que se recorre en cada una de las dos celdas comunicadas será “0,5” para desplazamientos ortogonales (en horizontal o en vertical) y “0,7071” para los desplazamientos en diagonal. En el caso de que el tamaño de celda fuese distinto, se multiplicarían esos valores por la dimensión correspondiente de la celda. Para estos primeros cálculos desde las celdas fuente, se multiplicará este factor por los valores de los costes simples de las celdas origen y destino que se recogen en la Superficie de Costes Simple de la región ejemplo (Figura 232).

Veamos paso a paso el proceso de cálculo que sigue el algoritmo.

Paso 1:

Partiendo de la celda fuente situada en la fila 1, columna 2, (marcada con cifra en rojo en la Figura 238) tendremos 3 posibles celdas destino en las que se harán las siguientes operaciones:

- fila1-columna1: $CAS = 0,5 \cdot (3 + 2) = 2,5$
- fila2-columna1: $CAS = 0,7071 \cdot (3 + 4) = 4,95$
- fila2-columna2: $CAS = 0,5 \cdot (3 + 6) = 4,5$

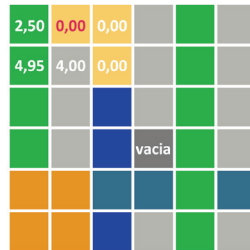


Figura 238. Resultados del primer paso de cálculo del CAS.

Paso 2:

Partiendo de la celda fuente situada en la fila 1, columna 3, tendremos 2 posibles celdas destino en las que se harán las siguientes operaciones:

- fila1-columna4: $CAS = 0,5 \cdot (1 + 1) = 1$
- fila2-columna4: $CAS = 0,7071 \cdot (4 + 6) = 7,07$

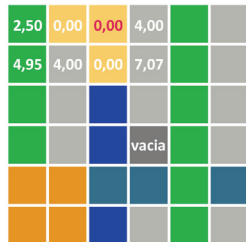


Figura 239. Resultados del segundo paso de cálculo del CAS.

Paso 3:

Partiendo de la celda fuente situada en la fila 2, columna 3, tendremos 6 posibles celdas destino en las que se harán las siguientes operaciones:

- fila2-columna2: $CAS = 0,5 \cdot (2 + 6) = 4$, es menor que el que había.
- fila3-columna2: $CAS = 0,7071 \cdot (2 + 5) = 4,95$
- fila3-columna3:

En este caso se trata de una celda que cuenta con valor en la Superficie de Coste Condicionado del Ferrocarril, por lo que debe realizarse una serie de comprobaciones. Como la celda de partida (fila2, columna3) pertenece a la Zona de Desplazamiento “Estación de ferrocarril”, que es el Nodo de la Zona de Desplazamiento “Vía férrea”, debemos considerar el cálculo con la Ecuación 29:

$$CAS_{id} = CAS_o + d \cdot (CS_o + CC_{id})$$

donde CAS_o sigue siendo cero, por lo que la operación sería

$$CAC_f = 0,5 \cdot (2 + 1) = 1,5$$

Como las zonas de ambas celdas son compatibles, calculamos también el CAS, que sería

$$CAS = 0,5 \cdot (2 + 7) = 4,5$$

- fila3-columna4: $CAS = 0,7071 \cdot (2 + 8) = 7,07$
- fila2-columna4: $CAS = 0,5 \cdot (2 + 6) = 4$, es menor que el que había.
- fila1-columna4: $CAS = 0,7071 \cdot (2 + 4) = 4,24$, es mayor que el ya calculado.

En este caso se calcula de nuevo sobre celdas destino que ya tenían un valor CAS calculado. En dos casos se consigue ahora un menor valor de CAS, por lo que se cambia por este nuevo valor. En otro caso, el valor calculado ahora es mayor que el existente, por lo que se mantiene el anterior.

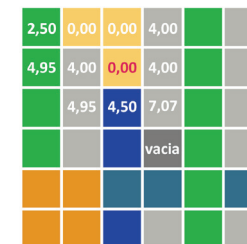


Figura 240. Resultados del tercer paso de cálculo del CAS.

Puesto que en este paso también se ha calculado el coste acumulado para la zona de desplazamiento condicionada por la vía férrea, también se almacena ese valor.

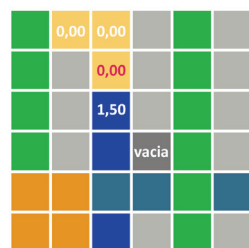


Figura 241. Resultado del cálculo del Coste Acumulado Condicionado del ferrocarril CAC_f .

Paso 4:

Del listado de valores de Coste Acumulado calculados, ya sean Simples (CAS) o Condicionados (CAC), se busca el menor de todos, que corresponde con la celda fila3-columna3, que presenta valor “1,5” (en color rojo en la **Figura 242**) para el Coste Acumulado Condicional asociado a la Vía férrea (CAC_f). Puesto que esta celda no pertenece a una zona de desplazamiento considerada Nodo en ese espacio condicionado, sólo podrá obtener el CAC_f de las celdas con valor en la SCC_f , contiguas a esta celda fila3-columna3.

La única posibilidad es calcular sobre la celda fila4-columna3 mediante la Ecuación 31

$$CAC_{id} = CAC_{io} + d \cdot (CC_{io} + CC_{id})$$

con lo que se obtiene

$$CAC_f = 1,5 + 0,5 \cdot (1 + 1) = 2,5$$



Figura 242. Resultado del cálculo del Coste Acumulado Condicionado del ferrocarril CAC_f .

Paso 5:

De todo el listado de valores de Coste Acumulado calculados, se busca el menor, que corresponde al valor “2,5” para CAS en la celda fila1-columna1, y también para CAC_f en la celda fila4-columna3.

En el caso del cálculo de CAS, los nuevos valores calculados para sus celdas vecinas (fila2-columna1 y fila2-columna2) no ofrecen valores menores a los ya existentes, por lo que esa celda se cerraría ya para el cálculo, almacenando su valor como definitivo.

En el caso del cálculo del CAC_f podemos seguir operando con la celda destino fila5-columna3, nuevamente mediante la Ecuación 25:

$$CAC_f = 2,5 + 0,5 \cdot (1 + 1) = 3,5$$

Este será ahora la celda de menor valor, por lo que podremos volver a calcular el CAC_f para la celda destino fila6-columna 3 mediante la Ecuación 25:

$$CAC_f = 3,5 + 0,5 \cdot (1 + 1) = 4,5$$

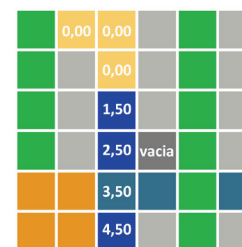


Figura 243. Resultado del cálculo del Coste Acumulado Condicionado del ferrocarril CAC_f .

Paso 6:

El menor valor ahora corresponde con “4”, que se encuentra en tres celdas. Empezamos por la celda de la fila2-columna2. En este caso tendremos CAS de la celda origen, por lo que también será tenido en cuenta en el cálculo mediante la Ecuación 24. Existen 3 posibles celdas destino en las que se harán las siguientes operaciones:

- fila2-columna1: $CAS = 4 + 0,5 \cdot (6 + 4) = 9$, es mayor que el que había
- fila3-columna1: $CAS = 4 + 0,7071 \cdot (6 + 5) = 11,78$
- fila3-columna2: $CAS = 4 + 0,5 \cdot (6 + 5) = 9,5$, es mayor que el que había.

2,50	0,00	0,00	4,00		
4,95	4,00	0,00	4,00		
11,78	4,95	4,50	7,07		
			vacía		

Figura 244. Resultados del sexto paso de cálculo de CAS.

Paso 7:

Partiendo de la celda de valor “4” situada en la fila1-columna4, tendremos 3 posibles celdas destino, aunque vamos a mostrar las 2 que podrían variar el valor calculado anteriormente, pues la otra es la celda de valor 4 (fila2-columna4), y tras la operación no se obtendría un valor menor a 4. Sobre las dos celdas destino restantes se harán las siguientes operaciones con Ecuación 24:

- fila1-columna5: $CAS = 4 + 0,5 \cdot (4 + 3) = 7,5$
- fila2-columna5: $CAS = 4 + 0,7071 \cdot (4 + 4) = 9,66$

2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	
4,95	4,00	0,00	4,00	9,66	
11,78	4,95	4,50	7,07		
			vacía		

Figura 245. Resultados del séptimo paso de cálculo de CAS.

Paso 8:

Partiendo de la celda de valor “4” situada en la fila2-columna4, tendremos 6 posibles celdas destino, aunque vamos a mostrar las 3 que podrían variar el valor calculado anteriormente, sobre las que se harán las siguientes operaciones con Ecuación 30:

- fila1-columna5: $CAS = 1 + 0,7071 \cdot (6 + 3) = 10,36$, no cambia pues es mayor que el que había
- fila2-columna5: $CAS = 4 + 0,5 \cdot (6 + 1) = 9$, cambia pues es menor que el que había
- fila3-columna5: $CAS = 4 + 0,7071 \cdot (6 + 3) = 10,36$, se considera pues es el primer valor calculado en esta celda.

2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	
11,78	4,95	4,50	7,07	10,36	
			vacía		

Figura 246. Resultado del octavo paso del cálculo de CAS.

Paso 9:

El menor valor de los calculados en este punto del proceso, corresponde con las celdas de valor “4,5” para el CAS en la fila3-columna3, y para CAC_f en la celda de la fila3-columna6. En este último caso, no se puede seguir calculando pues no hay más celdas vecinas a esta con valor en SCC_f .

Si tomamos como origen de cálculo la celda situada en la fila3-columna3, de todas las celdas vecinas posibles, sólo dos celdas destino generarán un valor de CAS a considerar mediante Ecuación 24.

- fila4-columna2: $CAS = 4,5 + 0,7071 \cdot (7 + 1) = 12,28$
- fila4-columna3: $CAS = 4,5 + 0,5 \cdot (7 + 5) = 10,5$



2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	
11,78	4,95	4,50	7,07	10,36	
	12,28	10,50	vacía		

Figura 247. Resultado del noveno paso del cálculo de CAS.

Paso 10:

Ahora el menor valor corresponde a “4,95” que se encuentra en las celdas fila2-columna1 y fila3-columna2. En el primer caso el cálculo variará el valor de la celda fila3-columna1, y en el segundo en las celdas fila4-columna1 y fila4-columna2.

2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	
9,45	4,95	4,50	7,07	10,36	
10,61	9,45	10,50	vacía		

Figura 248. Resultado del décimo paso del cálculo de CAS.

Con las siguientes celdas de menor valor “7,07”, “7,5” y “9” calculamos el CAS de forma similar también mediante la Ecuación 24 obteniendo los valores mostrados en la Figura 249.

2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	11,50
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	13,86
9,45	4,95	4,50	7,07	10,36	16,07
10,61	9,45	10,50	vacía	14,85	

Figura 249. Resultado de nuevos cálculos del CAS en el paso 10.

Paso 11:

En este punto, la celda con menor valor corresponde a las celdas de valor “9,45” situadas en la fila3-columna1 y en la fila4-columna2. En el primer caso, los cálculos sobre las celdas destino vecinas no generan un valor menor al ya calculado. En el segundo caso, la celda de la fila4-columna2 pertenece a la zona de desplazamiento “Terreno”, que según la matriz de condiciones no puede comunicarse con las zonas vecinas “Enlace VAC” y “VAC”, por lo que no podrá calcularse desde ella nuevos valores de CAS.

Seguimos con la celda siguiente de menor valor, que corresponde con el coste acumulado de “10,36” en la celda de la fila3-columna5, calculando nuevos valores para las celdas vecinas con Ecuación 24, variando los valores en la fila3-columna6 y en la fila4-columna5, que ya habían sido obtenidos en pasos previos.

2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	11,50
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	13,86
9,45	4,95	4,50	7,07	10,36	14,86
10,61	9,45	10,50	vacía	13,36	18,14

Figura 250. Resultado de cálculo de CAS en el paso 11.

Paso 12:

La siguiente celda de menor valor corresponde con la fila4-columna3, que posee un coste acumulado de “10,5”. Esta celda se encuentra en la Zona de Desplazamiento “Vía férrea”, por lo que no podrá comunicarse con la celda fila5-columna3 por tratarse de la Zona “VAC”, según la Matriz de Condiciones de Desplazamiento. Sin embargo, sí se permite el desplazamiento con la celda fila5-columna2, perteneciente a la Zona “Enlace VAC”, obteniendo el siguiente cálculo:

2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	11,50
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	13,86
9,45	4,95	4,50	7,07	10,36	14,86
10,61	9,45	10,50	vacía	13,36	18,14
	18,99				

Figura 251. Resultados del cálculo de CAS tras el paso 12.

Paso 13:

La siguiente celda de menor valor corresponde con un coste de “10,61” en la fila4-columna1. Se trata de una celda de la Zona “Carretera convencional” con lo que puede comunicarse con las dos celdas vecinas inferiores pertenecientes a la Zona “Enlace VAC”, modificando el valor de la celda fila5-columna2 antes calculada.

2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	11,50
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	13,86
9,45	4,95	4,50	7,07	10,36	14,86
10,61	9,45	10,50	vacía	13,36	18,14
14,11	17,68				

Figura 252. Resultados del CAS tras el paso 13.

Paso 14:

La siguiente celda de menor valor que añade nuevos valores a las celdas con costes calculados o aún sin coste, corresponde con un coste de “13,36” en la fila4-columna5 de la Zona “Carretera convencional”. Desde esta celda no se podrá comunicar con las celdas fila5-columna4 y fila5-columna6 por pertenecer a la Zona “VAC”, por lo que sólo se generará un valor nuevo del CAS para la celda fila5-columna5.

2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	11,50
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	13,86
9,45	4,95	4,50	7,07	10,36	14,86
10,61	9,45	10,50	vacía	13,36	18,14
14,11	17,68			15,86	

Figura 253. Resultados del CAS tras el paso 14.

Paso 15:

La siguiente celda de menor valor que genera cambios en el CAS corresponde con la celda de la fila5-columna1, de valor “14,11”. Esta celda se encuentra en la Zona “Enlace VAC”, que es Nodo del Espacio de Desplazamiento Condicionado correspondiente a la Vía de Alta Capacidad (VAC), por lo que los cálculos desde ella podrán tener particularidades, especialmente si las celdas destino tienen valor en la Superficie de Coste Condicional de la VAC. Concretamente van a producirse estos cálculos de coste acumulado con Ecuación 30:

- fila6-columna1: $CAS = 14,11 + 0,5 \cdot (4 + 3) = 17,61$
- fila6-columna2: $CAS = 14,11 + 0,7071 \cdot (4 + 2) = 18,35$
- fila5-columna2: $CAS = 14,11 + 0,5 \cdot (4 + 7) = 19,61$, mayor que el valor ya calculado en esta celda, por lo que no se cambia.

2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	11,50
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	13,86
9,45	4,95	4,50	7,07	10,36	14,86
10,61	9,45	10,50	vacía	13,36	18,14
14,11	17,68			15,86	
17,61	18,35				

Figura 254. Resultado de CAS tras el paso 15.

Sin embargo, esta celda presenta valor en la Superficie de Coste Condicionado de la Vía de Alta Capacidad (SCC_{VAC}), con lo que también debe calcularse el Coste Acumulado Condicionado para ese Espacio de Desplazamiento Condicionado, según la Ecuación 29:

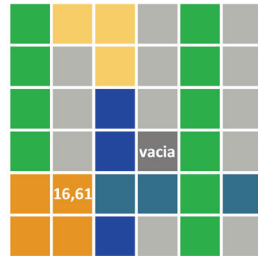


Figura 255. Resultados del Coste Acumulado Condicionado para las VAC (CAC_{VAC}) tras el paso 15.

Paso 16:

La siguiente celda de menor valor es la fila5-columna5, con “15,86”, que pertenece a la Zona “Carretera convencional” por lo que no tendrá comunicación con las celdas contiguas en la misma fila 5, pero sí con las tres inferiores de la fila 6, que se calculan con Ecuación 30.

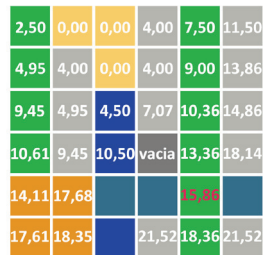


Figura 256. Resultados del CAS después del paso 16.

Paso 17:

En esta situación la siguiente celda de menor valor que provoca un cambio de coste acumulado es la de valor “16,61” perteneciente al CAC_{VAC} , de la fila5-columna2, por lo que podrá generar nuevos valores en CAS y en CAC_{VAC} . Esta celda (se muestra con fondo rojo en la Figura 257, y con cifra en rojo en la Figura 258), será la celda activa en este paso, pese a presentar sin embargo valor “17,68” para el CAS.

- fila5-columna1: Esta celda posee valor en SCC_{VAC} y además está en la Zona “Enlace VAC” por lo que es Nodo del Espacio de Desplazamiento Condicionado VAC, por lo que genera valor en CAS mediante la Ecuación 32,

$$CAS_D = CAC_{io} + d \cdot (CC_{io} + CS_D)$$

y en CAC_{VAC} , en este caso calculado con la Ecuación 31:

$$CAC_{id} = CAC_{io} + d \cdot (CC_{io} + CC_{id})$$

- $CAC_{VAL} - 16,61 + 0,5 \cdot (1 + 2) = 18,11$, es un valor nuevo que se almacena
- $CAS - 16,61 + 0,5 \cdot (1 + 4) = 19,11$, es mayor que el valor CAS existente, por lo que no se cambia.
- fila6-columna2:
 - $CAS - 16,61 + 0,5 \cdot (1 + 2) = 18,11$, es un valor menor que el existente en esa celda
- fila6-columna1: $CAS - 16,61 + 0,7071 \cdot (1 + 3) = 19,43$, mayor que el valor ya calculado previamente.
- fila5-columna3: Esta celda es Zona “VAC” y posee valor en SCC_{VAC}
 - $CAC_{VAC} = 16,61 + 0,5 \cdot (1 + 1) = 17,61$, es un valor nuevo

2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	11,50
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	13,86
9,45	4,95	4,50	7,07	10,36	14,86
10,61	9,45	10,50	vacía	13,36	18,14
14,11	17,68			15,86	
17,61	18,11		21,52	18,36	21,52

Figura 257. Resultados de CAS tras el paso 17.

			vacía		
18,11	16,61	17,61			

Figura 258. Resultado de CAC_{VAC} tras el paso 17.

Paso 18:

Para el cálculo del CAS la única celda que falta es la fila6-columna3, que obtiene su valor de coste a partir de la celda fila6-columna2, mediante Ecuación 24:

- fila6-columna3: $CAS = 18,11 + 0,5 \cdot (2 + 5) = 21,61$,

2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	11,50
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	13,86
9,45	4,95	4,50	7,07	10,36	14,86
10,61	9,45	10,50	vacía	13,36	18,14
14,11	17,68			15,86	
17,61	18,11	21,61	21,52	18,36	21,52

Figura 259. Resultados del cálculo final del CAS.

Paso 19:

Para el cálculo del CAC_{VAC} quedan calcular las celdas vacías en la fila 5, que se obtendrán a partir de la Ecuación 31, empezando los cálculos desde la celda de la fila5-columna3:

$$CAC_{iD} = CAC_{iO} + d \cdot (CC_{iO} + CC_{iD})$$

			vacía		
18,11	16,61	17,61	18,61	19,61	20,61

Figura 260. Resultados del cálculo final de CAC_{VAC} .

Paso 20:

Una vez que se obtiene el Coste Acumulado Simple (Figura 259) y el Coste Acumulado Condicionado (Figura 260 y Figura 243) para todas las celdas posibles, el Coste Acumulado que finalmente se obtiene de este proceso de cálculo, será el que se obtenga de designar a cada celda el menor valor de los que presente en los tres tipos de coste acumulado calculado, es decir, Simple (CAS), Condicionado para el ferrocarril (CAC_r) y Condicionado para las VAC (CAC_{VAC}), como se indica en la Ecuación 33.

Este coste final se recoge en un nuevo archivo denominado Coste Acumulado Global (Figura 261).



2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	11,50
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	13,86
9,45	4,95	1,50	7,07	10,36	14,86
10,61	9,45	2,50	vacía	13,36	18,14
14,11	17,68	3,50	18,61	15,86	20,61
17,61	18,11	4,50	21,52	18,36	21,52

Figura 261. Resultado final del proceso de cálculo, obteniendo el Coste Acumulado Global (CAG)

Si se aplica sobre los datos de partida del ejemplo (superficie de costes o de fricción y fuentes de desplazamiento), el algoritmo de Coste Distancia tradicional se obtiene el siguiente mostrado en la Figura 262.

2,50	0,00	0,00	4,00	7,50	11,50
4,95	4,00	0,00	4,00	9,00	13,86
9,45	4,95	4,50	7,07	10,36	14,86
10,61	9,45	10,50	vacía	13,36	18,14
14,11	14,95	13,69	14,74	15,86	18,31
17,61	16,52	17,19	18,24	17,57	21,52

Figura 262. Resultados del Coste Acumulado (CA) obtenido por el cálculo del Coste-Distancia.

Realizando una simple comparación celda a celda entre el CA mediante el método Coste Distancia (CD), y el CAG calculado con el algoritmo Coste Distancia Condicionado (CDC), restando los valores de ambas celdas, apreciamos las diferencias existentes. Se comprueba que en este ejemplo un 28% de las celdas varían su valor, con una variación media de un 5,4%, aunque en algún caso se llegan a variaciones de más del 75% (Figura 263).

0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0,00	0%	0%	0%
0%	0%	-67%	0%	0%	0%
0%	0%	-76%	vacía	0%	0%
0%	11%	-74%	26%	0%	13%
0%	10%	-74%	18%	5%	0%

Figura 263. Variación en porcentaje de los valores de coste entre el CAG y el CA.

Se comprueba como el método CDC mantiene los mismos valores que el CD en aquellas celdas próximas a las celdas fuente y que no son afectadas por alguna de las condiciones o restricciones de movimiento que se imponen en CDC. Sólo al llegar a los nodos de los Espacios de Desplazamiento Condicionados, tanto para la autopista como para el ferrocarril, se producen variaciones en los costes acumulados calculados.

Concretamente se aprecia como el ámbito del ferrocarril obtiene unos valores mucho más bajos mediante CDC, al considerar el desplazamiento en tren desde las celdas fuente. Las restricciones en el paso a la celda fila5-columna2 que se imponen en CDC en el enlace con la autopista, hacen que aumente el coste acumulado en esta celda con respecto al método CD. De igual forma, las celdas de la autopista (fila5-columna4 y fila5-columna6) aumentan su valor en CDC al no tener posibilidad de comunicación con zonas limítrofes.



Índice de figuras

Figura 1. Ejemplo del mapa dibujado por el Dr. John Snow que muestra mediante puntos las personas afectadas de cólera por beber agua de los pozos identificados mediante cruces. Fuente: Wikipedia.....	23
Figura 2. Relación estática de los componentes principales del SIG basada en la propuesta de (Andes, 2006), aunque él propone una división en: conceptos geográficos básicos; tecnología; datos; campos de aplicación; procesos y métodos; visualización.....	30
Figura 3. Relación dinámica de los componentes principales del SIG.....	30
Figura 4. Esquema de los modelos de representación vectorial (a) y ráster (b) (Fuente: Olaya, 2010).....	32
Figura 5. Esquema ideal de Infraestructuras de Datos Espaciales como soporte de información institucional y servicio a cualquier ciudadano del mundo.....	36
Figura 6. Ejemplo de visualización de información de infraestructuras viarias sobre gvSIG... ..	38
Figura 7. Análisis geoespacial de trazados viarios usando los algoritmos de SEXTANTE desde gvSIG.	39
Figura 8. Ejemplo de visualización de información de infraestructuras viarias sobre ArcGIS.	40
Figura 9. Pantalla de Teravial.....	42
Figura 10. Detalles del Sistema de gestión de carreteras AUDASA (SIGA).....	43
Figura 11. Pantalla del sistema de gestión de carreteras de la Diputación de Vizcaya.....	44
Figura 12. Catálogo de carreteras de la Red Provincial de la Diputación Provincial de Lugo....	44
Figura 13. Visualización de paneles luminosos sobre SANTI.	45
Figura 14. Evolución del parque y matriculaciones según tipo de vehículo. 2003-2012. Fuente: Anuario estadístico del Ministerio de Fomento 2012.....	51
Figura 15. Evolución del número de conductores por género. 2003-2012. Fuente: Anuario estadístico del Ministerio de Fomento 2012.....	51
Figura 16. Diferentes tipos de secciones de carretera recogidos en el Diccionario General de Arquitectura e Ingeniería de Pelayo Clairac (Aguilar Civera, 2010).....	55
Figura 17. Distribución por km y % de la titularidad de la red viaria en la provincia de A Coruña según datos de la EIEL de 2005.	58
Figura 18. Densidad de longitud de la red viaria en función de la superficie de cada municipio, según la titularidad estatal, autonómica, provincial o municipal de las carreteras, a partir de datos de la Encuesta de Infraestructuras y Equipamientos Locales de 2005 en la provincia de A Coruña.	60
Figura 19. Densidad de longitud de la red viaria total en función de la superficie de cada municipio, a partir de datos de la EIEL de 2005 en la provincia de A Coruña.	60

Figura 20. Representación 3D del trazado de una alternativa de autovía en Galicia desarrollado desde el Videalab de la Universidade da Coruña.....	62
Figura 21. Esquema de las relaciones de cálculo de los parámetros necesarios para obtener la velocidad media VM con la que determinar el nivel de servicio para una carretera convencional.....	66
Figura 22. Vehículo de medidas geométricas utilizado para el inventario de 2008 de la Red de Carreteras del Estado (Fomento, 2010).	67
Figura 23. Interfaz del Catálogo Visual de Carreteras.	68
Figura 24. Vías alternativas de unión entre dos localidades en los trabajos de Wellington. Fuente (P. Haggett, A. D. Cliff, A. Frey; 1977)	70
Figura 25. Modelo anisotrópico de las redes de comunicación. Fuente: R. Domanski, 1963.	74
Figura 26. Mapa territorial del casco céntrico de la ciudad de Residencia (Argentina) y esquema del grafo de la red de transporte público en esa área que analiza las conexiones entre paradas. Fuente (Cardozo, Gómez, & Parras, 2009).	74
Figura 27. Comparación entre la distancia Euclidiana (línea verde que mide la raíz de 72, es decir, 8.485); la distancia por sumas parciales (línea roja que mide la suma de la raíz de 29 y la raíz de 17, es decir, 9.508) y las diferentes opciones mediante la distancia Manhattan (líneas azules y naranja que todas tienen la misma longitud de 12 unidades). Basado en una figura de Wikipedia.	80
Figura 28. Esquemas de red de longitud mínima según distintos criterios de elección planteada por (Bunge, 1962)	81
Figura 29. Posibles caminos de comunicación dentro de una celda de un ráster (Douglas, 1994).....	84
Figura 30. Esquema de localización de puntos diferenciados al centro de una celda para establecer rutas de comunicación en una malla ráster (Bemmelen et al., 1993)	85
Figura 31. Tres tipos de patrones de vecindad para el formato de datos ráster (Yu et al., 2003).	85
Figura 32. Desplazamientos admisibles desde una celda origen a las celdas destino que la rodean, considerando un patrón de movimiento de 8 celdas.	86
Figura 33. Esquema de datos de entrada y de salida para el algoritmo de Coste Distancia.	86
Figura 34. Representación del proceso de cálculo de la superficie de coste acumulado.	87
Figura 35. Ejemplo de los dos ficheros ráster de entrada de datos (celdas fuente y superficie de costes), y del fichero ráster resultado de la aplicación del algoritmo coste distancia, donde se muestran los costes acumulados. Fuente: http://resources.arcgis.com	87
Figura 36. Ejemplo de los dos ficheros ráster de entrada de datos (celdas fuente y superficie de costes), y del fichero ráster resultado de la aplicación del algoritmo coste distancia, donde se muestran los costes acumulados. Cálculos propios.....	87

Figura 37. Diferencias para el cálculo de rutas de óptimas, siguiendo el método normal atravesando las celdas de menor valor acumulado (imagen central con el camino en rojo), o empleando el procedimiento propuesto por McIlhagga de seguir el camino que presente el menor coste de desplazamiento en ese recorrido (imagen de la derecha con el camino en verde), por lo que se atiende a la superficie de costes (imagen de la izquierda). Fuente: (Husdal, 2000).	88
Figura 38. Zonificación en el ejemplo comentado en la Figura 36	88
Figura 39. Ejemplo de diferentes rutas óptimas calculadas por a) modelo de coste distancia isotrópico; b) modelo considerando la distancia espacial (diferencia de cotas entre las celdas); c) modelo con variación de costes; d) modelo Smart Terrain para detectar potenciales puentes y túneles. (Yu et al., 2003).....	89
Figura 40. Esquema de los valores asignados a las celdas en función de la estructura de conexión que permite con las celdas vecinas, implementado por la empresa Thinkspace (2000) para el software MFworks. (Husdal, 2000)	90
Figura 41. Propuesta de identificadores de conexión desde celda central a 24 celdas vecinas y ejemplo de aplicación para pasos a distinto nivel (Husdal, 2000)	90
Figura 42. Esquema de las diferencias en el establecimiento de áreas de influencia respecto a un punto considerando distintas situaciones. La figura (A) muestra un terreno isotrópico puro. Las figuras (B) y (D) muestran diferentes elementos que aportan costes de desplazamiento distintos, por las zonas y por los movimientos (en coche, andando, en bici, etc.). La figura (C) muestra influencia de costes anisotrópicos. Basado en (Ray & Ebener, 2008)	91
Figura 43. Aplicación de la función COSTGROW de IDRISI para el cálculo de redes ecológicas por (Prélaz-Droux & Vuilleumier, 2002).....	93
Figura 44. Comparación de polígonos de isócronas ejecutados con r.cost de GRASS por (Lage Reis-Correia, 2010)	94
Figura 45. Ventana principal de la interfaz gráfica de la primera versión de LOCALIZA.	94
Figura 46. Mapa de los tiempos de viaje y recorridos mínimos desde centros del Campus universitario de Elviña a paradas de transporte urbano calculado con COST-DISTANCE de ArcGIS (Díaz Grandío, 2012).....	95
Figura 47. Ventana de entrada de datos para el cálculo del coste acumulado isotrópico desde SEXTANTE ejecutado desde gvSIG 1.12	95
Figura 48. Ejemplo de influencia de la variación de la constante k (ejemplo con 0,1 – 1 – 2 – 10) en la función VARCOST de IDRISI, donde el incremento de k genera rutas más lineales como muestra (Gietl et al., 2007)	96
Figura 49. Mapa de tiempos en Los Buchillones (Cuba) en intervalos de 30 minutos basados en desplazamientos a pie o en canoa, calculados mediante r.walk de GRASS por (Cooper, 2010)	97



Figura 50. Empleo de la función PATHDISTANCE de ArcGIS para calcular rutas en parques por (Jobe & White, 2009)	97
Figura 51. Cálculo de rutas de menor coste con tres programas diferentes: GRASS (naranja), ArcGIS (verde) e IDRISI (violeta). (Gietl et al., 2007)	98
Figura 52. Ventana de entrada de datos para el cálculo del coste acumulado anisotrópico desde SEXTANTE ejecutado desde gvSIG 1.12	98
Figura 53. Ejemplo propuesto por (Romo Peña & Torres Cantero, 2011) de ocho mapas de fricción para considerar movimientos anisotrópicos en un territorio.....	99
Figura 54. Ejemplo de no correlación en las distancias.....	106
Figura 55. Desajustes en la frecuencia de toma de datos PO-235 (Km 18)	106
Figura 56. Ejemplos de inexistencia de topología en la red de líneas generada.....	106
Figura 57. Ejemplo de recorrido no-lineal en la recogida de puntos correspondientes a la vía PO-230 y errores provocados en la creación de entidades lineales.....	107
Figura 58. Mezcla de colores de representación por los cambios frecuentes de características de los tramos (Varela García, Varela García, Lorenzo Tarrío, & Borobio Sanchiz, 2008)	107
Figura 59. Tabla “geometría” de CATVIS.....	109
Figura 60. Tabla “IRI” de CATVIS.....	110
Figura 61. Entidad geográfica base de geometría puntual obtenida en el proceso de asignación de atributos de las infraestructuras viarias	110
Figura 62. Transformación de elementos puntuales en elementos lineales	111
Figura 63. Transformación “por valores”: número de carriles	111
Figura 64. Transformación “por rangos”: ancho de calzada.....	111
Figura 65. Transformación “por cambios de signo”: pendientes	111
Figura 66. Transformación “por puntos de corte”: radios de curvatura	112
Figura 67. Transformación “mixta”: niveles de servicio	112
Figura 68. Representación de puntos por número de carriles en el núcleo de Cambados.....	113
Figura 69. Representación de tramos por número de carriles en el núcleo de Cambados.....	113
Figura 70. Tramificación sin atender a pequeñas variaciones en la serie de valores de los puntos (imagen de la izquierda) y tramificación considerando las pequeñas variaciones dentro del tramo en construcción (imagen de la derecha).	113
Figura 71. Captura de pantalla de la herramienta de tramificación de XAEL.....	114
Figura 72. Esquema de funcionamiento del proceso de tramificación lineal de carreteras a partir de la parametrización de una geometría de secuencia de puntos.	116

Figura 73. Esquema de las relaciones de cálculo de los parámetros necesarios para obtener la velocidad media VM con la que determinar el nivel de servicio para una carretera convencional, identificando la obtención de cada parámetro mediante procedimientos en el SIG.	117
Figura 74. Porcentaje de variación de costes acumulados calculados por el método de Coste Distancia sin tener en consideración las VAC (CDn) y el método de Coste Distancia Condicionado (CDC).....	118
Figura 75. División de la provincia de Pontevedra en las zonas de influencia de las ciudades de Vigo, Pontevedra y Vilagarcía de Arousa, resultantes del análisis de Coste Distancia Condicionado.	119
Figura 76. Zona de influencia de la ciudad de Vigo obtenida por el cálculo del punto más cercano aplicando el método de Coste Distancia Condicionado.	119
Figura 77. Ubicación sobre la ciudad de Vigo de la celda fuente para los cálculos de accesibilidad.	120
Figura 78. Clasificación del ámbito de análisis en función de la pendiente máxima en cada punto.....	121
Figura 79. Costes de desplazamiento para las infraestructuras viarias.....	123
Figura 80. Superficie de Costes a partir del valor de la pendiente del terreno y del tipo de viario existente en cada lugar.....	123
Figura 81. Detalle de la Superficie de Costes resultante de la valoración de los tiempos de desplazamiento en función de la pendiente máxima y del tipo de viario convencional. La resolución de la celda es de 100 metros.	124
Figura 82. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Coste Distancia sin tener en cuenta el Viario de Alta Capacidad.	124
Figura 83. Clasificación por rangos de tiempo de los valores calculados del coste acumulado.	125
Figura 84. Detalle del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia, sin tener en cuenta las VAC.	125
Figura 85. Histograma del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia sin considerar las VAC para el ámbito geográfico de análisis.	125
Figura 86. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, sin tener en cuenta las VAC.	126
Figura 87. Variación de los costes asignados a los tramos de las carreteras autonómicas del ámbito de análisis, comparando entre los obtenidos por el cálculo de la velocidad media de tramo (VM) y los asignados como velocidad tipo para este viario.	127

Figura 88. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Coste Distancia sin tener en cuenta el Viario de Alta Capacidad, considerando los costes asignados por la velocidad media por tramo (VM) en la red autonómica.	127
Figura 89. Histograma del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia sin considerar las VAC para el ámbito geográfico de análisis, y teniendo en cuenta la VM en la red autonómica.	128
Figura 90. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, sin tener en cuenta las VAC, y considerando la VM en la red autonómica.	128
Figura 91. Variación en el coste acumulado calculado con VT y con VM. Los colores verdes representan costes acumulados menores con VM, y los rojos al contrario. La zona en negro representa las celdas donde la variación, si existe, representa un porcentaje tan pequeño respecto al valor total, que se puede considerar nula. Se mantienen los trazados autonómicos para comprender los resultados.	128
Figura 92. Porcentaje de la variación en el coste acumulado calculado con VT y con VM. Los colores verdes representan costes acumulados menores con VM, y los anaranjados al contrario. La zona en negro representa las celdas donde la variación, si existe, representa un porcentaje tan pequeño respecto al valor total, que se puede considerar nula. Se mantienen los trazados autonómicos para comprender los resultados.	129
Figura 93. Número y porcentaje de celdas en función de su distancia a una carretera autonómica.....	129
Figura 94. Distribución del porcentaje de variación de costes acumulados en cada celda del ámbito, en función de la distancia a una carretera autonómica. En la figura de la derecha diferenciamos por colores la acumulación de celdas con el mismo valor.....	130
Figura 95. Distribución de la variación del coste acumulado en cada celda del ámbito, en función de la distancia a una carretera autonómica. En la figura de la derecha diferenciamos por colores la acumulación de celdas con el mismo valor.....	130
Figura 96. “Carte des Chemins de S.Jaques de Compostelle”, 1648. Archivo del Reino de Galicia, Colección Martínez Barbeito.	131
Figura 97. Municipios y parroquias dentro del ámbito del ETH.....	132
Figura 98. Paisaje en torno al camino en los montes de la parroquia de Vilavella. Triacastela.....	133
Figura 99. Trazados estudiados en torno a la villa de Melide. En amarillo, trazado jacobeo; en rojo, trazados oficiales; en verde, trazado UNESCO; en marrón, trazado histórico.	134
Figura 100. Ejemplo de datos obtenidos en un punto concreto del trazado del camino, tanto parámetros técnicos como foto asociada al lugar.....	134
Figura 101. Ejemplo de localización de puntos de toma de datos técnicos en el recorrido sobre el trazado del Camino Francés.....	135

Figura 102. Proceso de asignación de datos almacenados en los puntos recogidos en campo (color azul), al punto más cercano (color rojo) de los correspondientes al trazado del camino (color amarillo).....	136
Figura 103. Procesos de generación de puntos y resultado final de tramificación mediante XAEL, del camino según el tipo de pavimento en el entorno de Palas de Rei.....	136
Figura 104. Tramos del camino según el ISC. En tonos anaranjados las zonas de más riesgo y en azul las más seguras. Se aprecia como allí donde la ruta discurre por carretera el riesgo aumenta	138
Figura 105. Tramos del camino según el ICC. En tonos anaranjados las zonas de menos riesgo y en azul las más seguras. Se aprecia como allí donde la ruta discurre por carretera el riesgo aumenta	140
Figura 106. Tramos del camino según el IAC	140
Figura 107.- ICC en Melide. Se comprueba que muestra valores altos en el entorno del puente medieval de Furelos, y muy bajos en la entrada de Melide, donde atraviesa áreas empresariales y residenciales de nueva creación.	141
Figura 108. Camino francés a su paso por el municipio de Palas de Rei	141
Figura 109. Ventana del programa MFworks para asignar direcciones a las celdas que representan una red viaria (Husdal, 2000)	148
Figura 110. Cálculo del coste acumulado desde cualquier celda (X) del territorio a la celda fuente (Si) más cercana.	152
Figura 111. Cálculo del coste acumulado y la zonificación desde cualquier celda (X) del territorio al enlace VAC más cercano, en este caso (k, j, m).....	152
Figura 112. Cálculo del coste acumulado desde cualquier celda del trazado VAC a cada uno de los enlaces.	153
Figura 113. Esquema gráfico del funcionamiento del método de Suma de Costes Parciales. .	153
Figura 114. Esquema de datos de entrada y de salida para el algoritmo de Coste Distancia Condicionado.	156
Figura 115. Esquema de la representación de un paso a distinto nivel sobre la autopista, considerando este paso como perteneciente a la autopista. Movimientos permitidos para el cálculo del CAS. En este ejemplo, la autopista se representa con valor 3 y la carretera convencional con valor 2. La autopista en este caso no permite la continuidad de recorrido por la carretera convencional	163
Figura 116. Esquema de la representación de un paso a distinto nivel sobre la autopista, considerando este paso como perteneciente a la carretera convencional. Movimientos permitidos para el cálculo del CAS. En este ejemplo, la autopista se representa con valor 3 y la carretera convencional con valor 2. La carretera convencional mantiene su continuidad. .	163



Figura 117. Orden de capas para la definición de las Zonas de Desplazamiento para el análisis de las infraestructuras viarias en la accesibilidad territorial mediante el Modelo de Coste Distancia Condicionado.	164
Figura 118. Desplazamientos admisibles desde una celda origen a las celdas destino que la rodean.....	166
Figura 119. Esquema de cálculo del algoritmo Coste Distancia Condicionado cuando la celda origen presenta un Coste Acumulado Simple mínimo (CASmin).	168
Figura 120. Esquema de cálculo del algoritmo Coste Distancia Condicionado cuando la celda origen presenta un Coste Acumulado Condicionado mínimo (CACimin) asociado al Espacio de Desplazamiento Condicionado EDCi.	169
Figura 121. Esquema completo de cálculo del algoritmo Coste Distancia Condicionado.....	170
Figura 122. Archivos establecidos como datos de entrada en el ejemplo de ejecución del algoritmo CDC.....	172
Figura 123. Archivos resultado de ejecución del algoritmo CDC sobre el los datos de entrada de ejemplo.	172
Figura 124. Primera ventana de entrada de datos para la ejecución del algoritmo de Coste Distancia Condicionado.....	173
Figura 125. Ventana de selección de archivos ráster que definen una Superficie de Costes Condicionados (SCC).	173
Figura 126. Ventana para la definición de los parámetros de cada Zona de Desplazamiento. Sin datos.....	174
Figura 127. Ventana para la definición de los parámetros de cada Zona de Desplazamiento. Con datos identificados que se adaptan al ejemplo comentado en el apartado 5.3.3.....	174
Figura 128. Ventana para la definición de la Matriz de Condiciones de Desplazamiento. Aparecen marcados los permiso de movilidad asignados en el ejemplo descrito en el apartado 5.3.3.	175
Figura 129. Ventana de ejecución del algoritmo CDC.....	176
Figura 130. Ventana final de la ejecución del algoritmo CDC.....	176
Figura 131. Ámbito geográfico de análisis para los ensayos de accesibilidad.	180
Figura 132. Ubicación de las capitales de municipio consideradas como celdas fuente para los cálculos de accesibilidad.....	180
Figura 133. Coste de desplazamiento en el trazado de las Vías de Alta Capacidad.	181
Figura 134. Ubicación de los enlaces considerados en las Vías de Alta Capacidad del ámbito de análisis.	182

Figura 135. Zonas de Desplazamiento representativas del Terreno y de las Carreteras convencionales, necesarias para la ejecución del algoritmo CDC.	183
Figura 136. Diagrama de las operaciones espaciales necesarias para obtener las Zonas de Desplazamiento.	183
Figura 137. Zonas de Desplazamiento completas para la ejecución del algoritmo CDC.	184
Figura 138. Histograma de las Zonas de Desplazamiento en el ámbito de análisis en función del número de celdas ocupadas por cada zona.	184
Figura 139. Detalle de la configuración de las Zonas de Desplazamiento definitivas para el cálculo del algoritmo CDC.....	184
Figura 140. Imagen aérea del PNOA en la zona de detalle del ámbito de estudio. Detalle de un enlace sobre VAC.....	185
Figura 141. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Coste Distancia considerando el Viario de Alta Capacidad.	186
Figura 142. Detalle del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia considerando las VAC.....	186
Figura 143. Histograma del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia considerando las VAC para el ámbito geográfico de análisis.....	187
Figura 144. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, considerando las VAC. .	187
Figura 145. Zonas con variación del rango de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia sin considerar las VAC y el método de Coste Distancia considerando las VAC.....	188
Figura 146. Zonas según la variación de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia sin considerar las VAC y el método de Coste Distancia considerando las VAC.....	189
Figura 147. Diagrama de las operaciones espaciales necesarias para calcular el coste acumulado mediante el método de Suma de Costes Parciales.....	189
Figura 148. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Suma de Costes Parciales.....	190
Figura 149. Detalle del coste acumulado calculado con el método de Suma de Costes Parciales.....	190
Figura 150. Histograma del coste acumulado calculado con el método de Suma de Costes Parciales para el ámbito geográfico de análisis.	191
Figura 151. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Suma de Costes Parciales para el ámbito geográfico de análisis.	191

Figura 152. Zonas con variación del rango de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Suma de Costes Parciales y el método de Coste Distancia considerando las VAC.....	192
Figura 153. Zonas según la variación de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Suma de Costes Parciales y el método de Coste Distancia considerando las VAC.....	193
Figura 154. Detalle de la variación de costes acumulados entre SCP y CDVAC en la zona suroeste de la ciudad de Vigo.....	193
Figura 155. Zonificación de los enlaces de las VAC en el ámbito de análisis a partir del estudio del punto más cercano mediante el algoritmo de Coste Distancia.....	194
Figura 156. Localización de zonas con un cambio brusco en el valor del coste acumulado calculado con SCP. En este caso se resalta en rojo variaciones de más de 600 segundos en matrices de 3x3 celdas.....	194
Figura 157. Identificación de las franjas con cambios bruscos en la variación de costes acumulados calculados con SCP o CDVAC. En este caso se visualiza en verde brillante las variaciones de más de 300 segundos en matrices de 3x3 celdas.....	195
Figura 158. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Coste Distancia Condicionado.....	195
Figura 159. Detalle del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia Condicionado.....	196
Figura 160. Histograma del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis.....	196
Figura 161. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis.....	196
Figura 162. Gráfico comparativo entre las distribuciones del coste acumulado calculado con los cuatro métodos de accesibilidad considerados.....	197
Figura 163. Zonas con variación del rango de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicional y el método de Coste Distancia considerando las VAC, para este ámbito de estudio.....	197
Figura 164. Zonas según la variación de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicionado y el método de Coste Distancia considerando las VAC.....	198
Figura 165. Zonas según el porcentaje de la variación de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicionado y el método de Coste Distancia considerando las VAC.....	199
Figura 166. Clasificación del intervalo entre 0 y 300 segundos en la diferencia de costes acumulados calculados según el método CDC y el método CDVAC.....	199
Figura 167. Detalle de análisis de variaciones de la diferencia de coste acumulado calculado entre CDC y CDVAC en función de la distancia al trazado de las VAC.....	200

Figura 168. Gráfico de la distribución de la variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.....	200
Figura 169. Gráfico de la distribución de la variación porcentual de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.....	201
Figura 170. Variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para el acceso a Vigo.....	202
Figura 171. Distribución del número de puntos en función de la variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para el acceso a Vigo.....	202
Figura 172. Distribución del número de puntos en función del porcentaje de la variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para el acceso a Vigo.....	202
Figura 173. Histograma de la distribución del número de puntos en función de distancia a los enlaces a las VAC.....	203
Figura 174. Distribución del número de puntos hasta una distancia de 10 km a un enlace VAC, en función de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC (figura de la izquierda) y cuantificación de los mismos (figura de la derecha), para el acceso a Vigo.....	203
Figura 175. Distribución del número de puntos en función de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para el acceso a Vigo. La figura de la izquierda muestra estos valores hasta una distancia de 1 km a un enlace VAC. La figura de la derecha los muestra hasta una distancia de 5 km a un enlace VAC.....	203
Figura 176. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde las cabeceras comarcales mediante el algoritmo de Coste Distancia considerando el Viario de Alta Capacidad.....	204
Figura 177. Histograma del coste acumulado calculado para las cabeceras comarcales con el método de Coste Distancia considerando las VAC para el ámbito geográfico de análisis.....	205
Figura 178. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, considerando las VAC.....	205
Figura 179. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde las capitales de comarca del ámbito de análisis, mediante el algoritmo de Suma de Costes Parciales.....	206



Figura 180. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado de las cabeceras comarcales con el método de Suma de Costes Parciales para el ámbito geográfico de análisis.	206
Figura 181. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde las cabeceras de comarca del ámbito geográfico de análisis, mediante el algoritmo de Coste Distancia Condicionado.....	207
Figura 182. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado de las cabeceras comarcales con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis.	207
Figura 183. Zonas con variación del rango de tiempos acumulados a cabeceras comarcales, entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicional y el método de Coste Distancia considerando las VAC, para este ámbito de estudio.	208
Figura 184: Variación de tiempos: v_cdc_cdvac_c.tif	209
Figura 185. Zonas según la variación de tiempos acumulados a cabeceras comarcales entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicionado y el método de Coste Distancia considerando las VAC	210
Figura 186. Detalle del porcentaje de variación del coste acumulado calculado entre CDC y CDVAC, con respecto al valor calculado por CDVAC, para el análisis de las cabeceras comarcales en el ámbito de estudio.....	210
Figura 187. Clasificación del intervalo entre 0 y 300 segundos en la diferencia de costes acumulados calculados según el método CDC y el método CDVAC para las cabeceras comarcales en el ámbito de estudio.....	210
Figura 188. Gráfico de la distribución de la variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo 0-300 segundos del cálculo de las cabeceras comarcales en el ámbito de estudio.....	211
Figura 189. Gráfico de la distribución de la variación del porcentaje de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo 0-300 segundos del cálculo de las cabeceras comarcales en el ámbito de estudio.	211
Figura 190. Gráfico de la distribución de la variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el cálculo de las cabeceras comarcales en todo el ámbito de estudio.	212
Figura 191. Gráfico de la distribución de la variación del porcentaje de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el cálculo de las cabeceras comarcales en todo el ámbito de estudio.....	212

Figura 192. Variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CD, para análisis de cabeceras de comarca.	213
Figura 193. Distribución del número de puntos en función de la variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CD, para análisis de cabeceras de comarca.	213
Figura 194. Distribución del número de puntos hasta una distancia de 10 km a un enlace VAC, en función de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC (figura de la izquierda) y cuantificación de los mismos (figura de la derecha), para análisis de cabeceras de comarca.	213
Figura 195. Distribución del número de puntos hasta una distancia de 10 km a un enlace VAC, en función del porcentaje de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC (figura de la izquierda) y cuantificación de los mismos (figura de la derecha), para análisis de cabeceras de comarca.	214
Figura 196. Distribución del número de puntos en función de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CD, para análisis de cabeceras de comarca. La figura de la izquierda muestra estos valores hasta una distancia de 1 km a un enlace VAC. La figura de la derecha los muestra hasta una distancia de 5 km a un enlace VAC.	214
Figura 197. Distribución del número de puntos en función del porcentaje de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CD, para análisis de cabeceras de comarca. La figura de la izquierda muestra estos valores hasta una distancia de 1 km a un enlace VAC. La figura de la derecha los muestra hasta una distancia de 5 km a un enlace VAC.	214
Figura 198. Detalle entre la distancia 4.000 y 5.000 m, de la distribución del número de puntos en función de la variación en tiempo y porcentaje entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para análisis de cabeceras de comarca.	214
Figura 199. Detalle de la configuración de las Zonas de Desplazamiento definitivas para el cálculo del algoritmo CDC con un tamaño de celda de 25 metros.	217
Figura 200. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Coste Distancia considerando el Viario de Alta Capacidad, con resolución de 25 metros.....	218
Figura 201. Detalle del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia considerando las VAC, con una resolución de 25 metros. Se incluye el viario vectorial para ayudar a interpretar los resultados.....	218

Figura 202. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia considerando las VAC para el ámbito geográfico de análisis, y con resolución de 25 metros.....	338
Figura 203. Tiempos o costes acumulados en los desplazamientos desde Vigo mediante el algoritmo de Coste Distancia Condicionado en el ámbito de estudio con resolución de 25 metros.....	219
Figura 204. Detalle del coste acumulado calculado con el método de Coste Distancia Condicionado con resolución de 25 metros.....	219
Figura 205. Gráfico de la distribución de las celdas y de los valores del coste acumulado con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis.....	220
Figura 206. Zonas con variación del rango de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicional y el método de Coste Distancia considerando las VAC, para este ámbito de estudio.....	221
Figura 207. Zonas según la variación de tiempos acumulados entre el cálculo por el método de Coste Distancia Condicionado y el método de Coste Distancia considerando las VAC, con resolución de 25 metros.....	221
Figura 208. Gráfico de la distribución de la variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC_25 y CDVAC_25 en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.....	222
Figura 209. Gráfico de la distribución de la variación de los porcentajes de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC_25 y CDVAC_25, con respecto a los costes acumulados calculados en CDVAC_25, en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.....	223
Figura 210. Gráfico de la distribución de la variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC_25 y CDVAC_25 en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para todo el ámbito geográfico de análisis.....	223
Figura 211. Gráfico de la distribución de la variación porcentual de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC_25 y CDVAC_25 en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para todo el ámbito geográfico de análisis.....	224
Figura 212. Variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para análisis a Vigo con resolución de 25m.....	225
Figura 213. Distribución del número de puntos en función de la variación de tiempo (figura de la izquierda) y porcentaje de variación (figura de la derecha) entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para el acceso a Vigo con resolución de 25m.....	225
Figura 214. Histograma de la distribución del número de puntos en función de distancia a los enlaces a las VAC para el análisis de accesibilidad con resolución de 25m.....	225

Figura 215. Distribución del número de puntos hasta una distancia de 10 km a un enlace VAC, en función de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC (figura de la izquierda) y cuantificación de los mismos (figura de la derecha), para análisis con resolución 25 m.....	225
Figura 216. Distribución del número de puntos hasta una distancia de 10 km a un enlace VAC, en función del porcentaje de la variación de tiempo entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC (figura de la izquierda) y cuantificación de los mismos (figura de la derecha), para análisis con resolución 25 m.....	226
Figura 217. Detalle entre la distancia 0 y 5.000 m, de la distribución del número de puntos en función de la variación en tiempo y porcentaje entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para análisis con resolución de 25m.....	226
Figura 218. Detalle entre la distancia 0 y 1.000 m, de la distribución del número de puntos en función de la variación en tiempo y porcentaje entre los costes acumulados resultado del método CDC y los costes acumulados resultado del método CDVAC, para análisis con resolución de 25m.....	226
Figura 219. Ubicación de puntos aleatorios en el entorno de la ciudad de Vigo.....	226
Figura 220. Esquema del procedimiento de cálculo para obtener rutas mínimas a partir de los costes acumulados calculados previamente.....	227
Figura 221. Caminos óptimos desde puntos aleatorios del entorno de Vigo calculados por análisis de redes vectoriales y a partir de los resultados por el método CDVAC con resolución de 25 metros.....	227
Figura 222. Detalle de los trazados de los caminos óptimos calculados por análisis de redes y mediante el método de CDVAC con resolución de 25 metros.....	228
Figura 223. Distribución de la diferencia de tiempos entre el calculado por análisis de redes y por el método CDVAC con resolución de 25 metros.....	228
Figura 224. Caminos óptimos desde puntos aleatorios del entorno de Vigo calculados por análisis de redes vectoriales y a partir de los resultados por el método CDVAC con resolución de 100 metros.....	229
Figura 225. Distribución de la diferencia de tiempos entre el calculado por análisis de redes y por el método CDVAC con resolución de 100 metros.....	229
Figura 226. Caminos óptimos desde puntos aleatorios del entorno de Vigo calculados por análisis de redes vectoriales y a partir de los resultados por el método CDC con resolución de 100 metros.....	230
Figura 227. Distribución de la diferencia de tiempos entre el calculado por análisis de redes y por el método CDC con resolución de 100 metros.....	230



Figura 228. Caminos óptimos desde puntos aleatorios del entorno de Vigo calculados por análisis de redes vectoriales y a partir de los resultados por el método CDC con resolución de 25 metros.....	231
Figura 229. Detalle de la conexión con las VAC de los caminos óptimos desde puntos aleatorios del entorno de Vigo calculados por análisis de redes vectoriales y a partir de los resultados obtenidos por el método CDC con resolución de 25 metros.	231
Figura 230. Distribución de la diferencia de tiempos entre el calculado por análisis de redes y por el método CDC con resolución de 25 metros.	232
Figura 231. Capitales de municipio en el ámbito de estudio.	232
Figura 232. Superficie de Costes Simple de la región ejemplo (SCS).	265
Figura 233. Distribución de las zonas de desplazamiento del ejemplo.	266
Figura 234. Superficie de Coste Condicionado para la Vía de Alta Capacidad (SCCVAC).....	266
Figura 235. Superficie de Coste Condicionado para la Vía férrea (SCCf).	266
Figura 236. Matriz de Condiciones de Desplazamiento para las zonas del ejemplo.	267
Figura 237. Definición de celdas fuente de desplazamientos en la región ejemplo.	267
Figura 238. Resultados del primer paso de cálculo del CAS.	268
Figura 239. Resultados del segundo paso de cálculo del CAS.	268
Figura 240. Resultados del tercer paso de cálculo del CAS.	268
Figura 241. Resultado del cálculo del Coste Acumulado Condicionado del ferrocarril CACf.	269
Figura 242. Resultado del cálculo del Coste Acumulado Condicionado del ferrocarril CACf.....	269
Figura 243. Resultado del cálculo del Coste Acumulado Condicionado del ferrocarril CACf.....	269
Figura 244. Resultados del sexto paso de cálculo de CAS.	270
Figura 245. Resultados del séptimo paso de cálculo de CAS.	270
Figura 246. Resultado del octavo paso del cálculo de CAS.	270
Figura 247. Resultado del noveno paso del cálculo de CAS.....	271
Figura 248. Resultado del décimo paso del cálculo de CAS.....	271
Figura 249. Resultado de nuevos cálculos del CAS en el paso 10.....	271
Figura 250. Resultado de cálculo de CAS en el paso 11.	271
Figura 251. Resultados del cálculo de CAS tras el paso 12.	272
Figura 252. Resultados del CAS tras el paso 13.	272

Figura 253. Resultados del CAS tras el paso 14.....	272
Figura 254. Resultado de CAS tras el paso 15.	272
Figura 255. Resultados del Coste Acumulado Condicionado para las VAC (CACVAC) tras el paso 15.	273
Figura 256. Resultados del CAS después del paso 16.	273
Figura 257. Resultados de CAS tras el paso 17.	274
Figura 258. Resultado de CACVAC tras el paso 17.	274
Figura 259. Resultados del cálculo final del CAS.....	274
Figura 260. Resultados del cálculo final de CACVAC.....	274
Figura 261. Resultado final del proceso de cálculo, obteniendo el Coste Acumulado Global (CAG).....	275
Figura 262. Resultados del Coste Acumulado (CA) obtenido por el cálculo del Coste-Distancia.	275
Figura 263. Variación en porcentaje de los valores de coste entre el CAG y el CA.....	275



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación básica de los diferentes tipos de análisis espacial que se pueden realizar en un SIG.....	34
Tabla 2. Titularidad de la red viaria en los municipios menores de 50.000 habitantes de la provincia de A Coruña según datos EIEL actualizados a 2005, comparados con los datos del resto de provincias españolas que realizaron la EIEL de 2000 (Varela García, Infraestructuras viarias, 2007).	59
Tabla 3. Comparación internacional de estándares de red viaria interurbana por habitante y por extensión superficial. Índices de densidad de la red viaria interurbana en función de la superficie territorial (índice de longitud, IL, km/km ²) y según la población (índice de población, IP, km/1000hab). La información de otros países proviene de las estadísticas de la International Road Federation (IRF) y corresponde al año 1996, mientras que los datos españoles corresponden al informe del Ministerio de Fomento del año 1998.	61
Tabla 4. Clasificación de los parámetros de una carretera.....	63
Tabla 5. Listado de parámetros almacenados en las tablas de la base de datos de CATVIS... 69	
Tabla 6. Problemas identificados en los datos del CATVIS de la red autonómica gallega de 2006.....	107
Tabla 7. Atributos asociados a la base de puntos de las carreteras autonómicas y relación de los mismos entre CATVIS y la entidad de geometría puntual del SIG. En esta tabla CV significa que procede de la información de CATVIS.	109
Tabla 8. Resultados de transformaciones de entidades puntuales a entidades lineales.....	112
Tabla 9. Velocidad (km/h) y tiempo (segundos por metro recorrido) que se asigna al recorrido a pie en función de la pendiente (%) del terreno.....	122
Tabla 10. Asignación de velocidades a los trazados según tipología viaria, y el coste de tiempo (en segundos) que supone recorrer 100 metros a esa velocidad.....	122
Tabla 11. Tiempos asignados en segundos como coste para recorrer distancias de 100 metros, en función de la velocidad asignada.....	123
Tabla 12. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, sin tener en cuenta las VAC.	126
Tabla 13. Comparación de costes asignados a los trazados del viario considerando la velocidad tipo (VT) procedente de datos de NavTeq, y a los trazados del viario con velocidad media por tramo (VM) procedentes de la parametrización puntual de los datos del CATVIS.....	127
Tabla 14. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, sin tener en cuenta las VAC, y considerando la VM en la red autonómica.....	128

Tabla 15. Análisis estadístico del porcentaje de variación del coste acumulado calculado teniendo en cuenta una velocidad tipo (VT) para la red autonómica o su velocidad media calculada por tramo (VM).....	129
Tabla 16. Valoración de elementos del indicador de morfología (IMC)	137
Tabla 17. Valoración de elementos del indicador de ancho de plataforma (IAP)	137
Tabla 18. Valoración de elementos del indicador de estado del pavimento (IEP)	138
Tabla 19. Valoración de elementos del indicador de regularidad del pavimento (IRP)	138
Tabla 20. Valoración de elementos del indicador de márgenes, válido tanto para el borde derecho como para el izquierdo (IM)	138
Tabla 21. Valoración de elementos del indicador de regularidad del pavimento (IRP)	139
Tabla 22. Valoración de elementos del indicador de estado de conservación del pavimento (ICP).....	139
Tabla 23. Valoración de elementos del indicador de tipo de plataforma (ITP).....	139
Tabla 24. Valoración de elementos del indicador de visibilidad (IV)	139
Tabla 25. Ejemplo de definición de las zonas de desplazamiento para el análisis de las infraestructuras viarias en la accesibilidad territorial mediante el modelo de Coste Distancia Condicionado.....	162
Tabla 26. Ejemplo de Matriz de Condiciones de Desplazamiento para el cálculo del Coste Acumulado Simple en el análisis viario de la accesibilidad territorial mediante el modelo de Coste Distancia Condicionado.	162
Tabla 27. Distribución del número de celdas por Zona de Desplazamiento en el ámbito geográfico de análisis.	184
Tabla 28. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, considerando las VAC.	187
Tabla 29. Variación porcentual de superficie y costes acumulados en cada uno de los rangos de tiempo, entre considerar o no las VAC en el método de Coste Distancia.....	188
Tabla 30. Diferencias entre el coste calculado con CDN y con CDVAC en la superficie del ámbito de análisis.	188
Tabla 31. Capas empleadas en el procedimiento de Suma de Costes Parciales aplicado al ámbito de análisis.	190
Tabla 32. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Suma de Costes Parciales para el ámbito geográfico de análisis.....	191
Tabla 33. Variación porcentual de superficie y costes acumulados en cada uno de los rangos de tiempo, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Suma de Costes Parciales.....	192

Tabla 34. Diferencias entre el coste calculado con SCP y con CDVAC en la superficie del ámbito de análisis.	193
Tabla 35. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis.	196
Tabla 36. Variación porcentual de superficie y costes acumulados en cada uno de los rangos de tiempo, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Coste Distancia Condicionado.	197
Tabla 37. Diferencias entre el coste calculado con CDC y con CDVAC en la superficie del ámbito de análisis.	198
Tabla 38. Diferencias de costes acumulados entre 0 y 5 minutos, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Coste Distancia Condicionado.....	199
Tabla 39. Variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.	200
Tabla 40. Porcentaje de la diferencia de costes acumulado entre los métodos CDC y CDVAC, con respecto al valor del coste acumulado para CDVAC, en función de la distancia al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.	201
Tabla 41. Variación media de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la Zona de Desplazamiento.	201
Tabla 42. Análisis de los valores del coste acumulado calculado (en segundos) por CDC, en función de la Zona de Desplazamiento.	201
Tabla 43. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos para las cabeceras comarcales con el método de Coste Distancia para el ámbito geográfico de análisis, considerando las VAC.	205
Tabla 44. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos para las cabeceras comarcales con el método de Suma de Costes Parciales para el ámbito geográfico de análisis.	206
Tabla 45. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos para las cabeceras comarcales con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis.	207
Tabla 46. Variación porcentual de superficie y costes acumulados en cada uno de los rangos de tiempo, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Coste Distancia Condicionado, para el análisis de las cabeceras de comarca en el ámbito de estudio.	208
Tabla 47. Diferencias entre el coste acumulado calculado para las cabeceras de comarca con CDC y con CDVAC en la superficie del ámbito de análisis.	209



Tabla 48. Diferencias de costes acumulados entre 0 y 5 minutos, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Coste Distancia Condicionado para las cabeceras comarcales.	210
Tabla 49. Variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo 0-300 segundos del cálculo de las cabeceras comarcales en el ámbito de estudio.	211
Tabla 50. Porcentaje de la diferencia de costes acumulado entre los métodos CDC y CDVAC, con respecto al valor del coste acumulado para CDVAC, en función de la distancia al trazado de las VAC, para el intervalo 0-300 segundos del cálculo de las cabeceras comarcales en el ámbito de estudio.	211
Tabla 51. Variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el cálculo de las cabeceras comarcales en todo el ámbito de estudio.	212
Tabla 52. Porcentaje de la diferencia de costes acumulado entre los métodos CDC y CDVAC, con respecto al valor del coste acumulado para CDVAC, en función de la distancia al trazado de las VAC, para el cálculo de las cabeceras comarcales en todo el ámbito de estudio.	212
Tabla 53. Variación media de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la Zona de Desplazamiento para el análisis de las cabeceras comarcales.	213
Tabla 54. Distribución del número de celdas por Zona de Desplazamiento en el ámbito geográfico de análisis para una resolución de celda de 25 metros.	216
Tabla 55. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Coste Distancia considerando las VAC para el ámbito geográfico de análisis, y con una resolución de 25 metros.	217
Tabla 56. Variación porcentual de superficie en cada uno de los rangos de tiempo, entre usar el método de Coste Distancia considerando las VAC, con resolución de 100 metros o con resolución de 25 metros.	218
Tabla 57. Análisis estadístico de los valores de coste acumulado obtenidos con el método de Coste Distancia Condicionado para el ámbito geográfico de análisis con resolución de 25 metros.	220
Tabla 58. Variación porcentual de superficie y costes acumulados en cada uno de los rangos de tiempo, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Coste Distancia Condicionado, para una resolución de 25 metros.	220
Tabla 59. Diferencias entre el coste calculado con CDC y con CDVAC en la superficie del ámbito de análisis para una resolución de 25 metros.	221

Tabla 60. Diferencias de costes acumulados entre 0 y 5 minutos, entre considerar las VAC en el método de Coste Distancia, o calcularlos mediante Coste Distancia Condicionado.	222
Tabla 61. Variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC_25 y CDVAC_25 en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.	222
Tabla 62. Porcentaje de la diferencia de costes acumulado entre los métodos CDC_25 y CDVAC_25, con respecto al valor del coste acumulado para CDVAC_25, en función de la distancia al trazado de las VAC, para el intervalo menor a 5 minutos.	223
Tabla 63. Variación de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC_25 y CDVAC_25 en función de la distancia (en kilómetros) al trazado de las VAC, para todo el ámbito geográfico de análisis.	223
Tabla 64. Porcentaje de la diferencia de costes acumulado entre los métodos CDC_25 y CDVAC_25, con respecto al valor del coste acumulado para CDVAC, en función de la distancia al trazado de las VAC, para todo el ámbito geográfico de análisis.	224
Tabla 65. Variación media de la diferencia del coste acumulado calculado (en segundos) entre CDC y CDVAC en función de la Zona de Desplazamiento.	224
Tabla 66. Análisis de los valores del coste acumulado calculado (en segundos) por CDC, en función de la Zona de Desplazamiento.	225
Tabla 67. Longitud y superficie de los caminos óptimos obtenidos por análisis de redes y por los resultados calculados mediante CDVAC con resolución de 25 metros.	227
Tabla 68. Longitud y superficie de los caminos óptimos obtenidos por análisis de redes y por los resultados calculados mediante CDVAC con resolución de 100 metros.	228
Tabla 69. Longitud y superficie de los caminos óptimos obtenidos por análisis de redes y por los resultados calculados mediante CDVAC con resolución de 100 metros.	230
Tabla 70. Longitud y superficie de los caminos óptimos obtenidos por análisis de redes y por los resultados calculados mediante CDC con resolución de 25 metros.	230



ABREVIATURAS

Utilizadas en el texto, especialmente en el capítulo 6:

- SIG: Sistema de Información Geográfica
- CD: algoritmo Coste Distancia
- CDn: algoritmo Coste Distancia sin considerar VAC en los cálculos
- CDVAC: algoritmo Coste Distancia considerando VAC en los cálculos
- VAC: Vías de Alta Capacidad
- SCP: método de Suma de Costes Parciales
- CDC: algoritmo Coste Distancia Condicionado
- O : celda origen
- D: celda destino
- CAC_i : Coste Acumulado Condicional para el Espacio de Desplazamiento Condicionado específico (EDCi).
- CAC_{i0} : Coste Acumulado Condicional de la celda origen para el Espacio de Desplazamiento Condicionado específico (EDC_i).
- CAC_{iD} : Coste Acumulado Condicional de la celda destino para el Espacio de Desplazamiento Condicionado específico (EDC_i).
- CAS_0 : Coste Acumulado Simple de la celda origen.
- CAS_D : Coste Acumulado Simple de la celda destino.
- EDC_i: Espacio de Desplazamiento Condicionado específico
- CAS: Coste Acumulado Simple

- min: Valor mínimo de los costes acumulados
- ZD: Zona de Desplazamiento
- ZD_o : Zona de Desplazamiento de la celda origen
- ZD_d : Zona de Desplazamiento de la celda destino
- SCS: Superficie de Costes Simples
- SCC: Superficie de Costes Condicionados
- SCC_i : Superficie de Costes Condicionados en el Espacio de Desplazamiento Condicionado específico (EDC_i).
- CC_{io} : Valor del Coste Condicionado de la celda origen en la SCC_i
- CC_{id} : Valor del Coste Condicionado de la celda destino en la SCC_i
- CS_o : Valor del Coste Simple de la celda origen en la SCS
- CS_d : Valor de la Superficie de Costes en la celda destino
- d: Distancia geométrica entre el centro de la celda origen y la celda destino.

